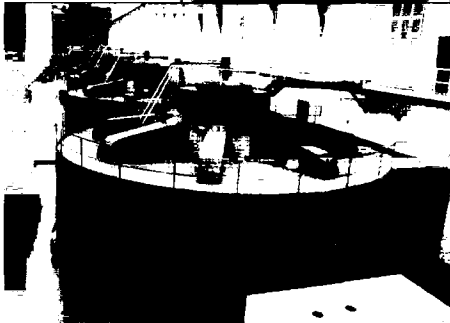


Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун

Загальна
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
теорія і практикум



ПІДРУЧНИК
для студентів вищих закладів освіти

Видавництво "Каравела"

ББК 31.2
УДК 621.3 (075.8)
П16

*Гриф надано Міністерством освіти
і науки України, лист № 14/18.2-253
від 11.02.2003 р.*

Рецензенти:

Б. І. Кузнецов,

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
систем управління і автоматизації промислових установок
Української інженерно-педагогічної академії;

І. О. Фурман,

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
автоматизації та комп'ютерних технологій Харківського державного
технічного університету сільського господарства.

П16 Паначевний Б. І., Свєргун Ю. Ф.

Загальна електротехніка: теорія і практикум: Підручник. – К.:
Каравела, 2004. – 440 с.

ISBN 966-8019-06-7

Підручник написано у відповідності з програмами підготовки молодших спеціалістів, бакалаврів, спеціалістів і магістрів. У ньому вміщено відомості про теорії електричних і магнітних кіл, розглянуто перехідні процеси і нелінійні електричні кола. Описано будову, принципи роботи, основні співвідношення електричних машин постійного і змінного струмів, електричних мікромашин. Наведено принципи електровимірювання, будову електровимірювальних приладів. Розглянуто питання електроприводу, електрозабезпечення, викладені основи напівпровідникової техніки.

Підручник також містить методичні рекомендації по виконанню лабораторних робіт, задачі та вправи до кожного розділу курсу. Типові задачі наведені із розв'язком.

Підручник призначено для студентів вищих навчальних закладів і для самостійного вивчення курсу.

ББК 31.2
УДК 621.3 (075.8)

ISBN 966-8019-06-7

© Паначевний Б. І., Свєргун Ю. Ф., 2004
© Видавництво “Каравела”, 2004

ПЕРЕДМОВА	8
ЧАСТИНА I. ТЕОРЕТИЧНИЙ КУРС	
1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	
1.1. Основні визначення	9
1.2. Величини електричного кола	9
1.3. Параметри електричного кола	10
1.4. Елементи електричного кола	11
1.5. Схеми заміщення	12
2. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
2.1. Передавання потужності від джерела до навантаження	13
2.2. Змішане з'єднання приймачів	16
2.3. Застосування законів Кірхгофа	17
2.4. Метод суперпозиції	19
2.5. Метод вузлової напруги	20
2.6. Метод еквівалентних перетворень	21
2.7. Метод контурних струмів	23
2.8. Побудова потенційних діаграм	24
3. НЕЛІНІЙНІ КОЛА	
3.1. Загальні визначення	26
3.2. Графічний метод розрахунку	27
3.3. Аналітичний метод розрахунку	28
4. КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	
4.1. Основні визначення	30
4.2. Діюче значення синусоїдних величин	31
4.3. Метод векторних діаграм	32
4.4. Символічний метод	33
4.5. Активний опір у колі синусоїдного струму	34
4.6. Індуктивність у колі змінного струму	35
4.7. Ємність у колі синусоїдного струму	36
4.8. Нерозгалужені кола	37
4.9. Розгалужені електричні кола	39
4.10. Трикутники опорів та провідностей. Співвідношення між опором та провідностями	42
4.11. Потужність кола синусоїдного струму	43
4.12. Коефіцієнт потужності. Підвищення коефіцієнта потужності	45
4.13. Явище резонансу	46
4.14. Чотириполосники	48

5. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

5.1. Основні положення	52
5.2. З'єднання зіркою	53
5.3. З'єднання трикутником	55
5.4. Потужність трифазної системи	56
5.5. Перемикання навантаження із зірки на трикутник та навпаки	59
5.6. Розрахунок симетричних трифазних систем	60
5.7. Розрахунок несиметричних систем	61

6. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

6.1. Основні положення	65
6.2. Перехідні процеси у колах постійного струму з індуктивністю	65
6.3. Перехідні процеси у колах постійного струму з ємністю	68
6.4. Примусові та вільні складові перехідних струмів і напруг	69
6.5. Перехідні процеси у колах синусоїдного струму з індуктивністю	70
6.6. Перехідні процеси у колах синусоїдного струму з ємністю	72

7. МАГНІТНІ КОЛА З ПОСТІЙНОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ

7.1. Основні поняття	74
7.2. Закони електромагнетизму	74
7.3. Феромагнетики	77
7.4. Енергія магнітного поля	80
7.5. Взаємна індуктивність	81
7.6. Обчислення однорідних магнітних кіл	83
7.7. Обчислення неоднорідних магнітних кіл	84
7.8. Розрахунок підйомної сили електромагніта	87

8. МАГНІТНІ КОЛА ЗІ ЗМІННОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ

8.1. Основні поняття	88
8.2. Змінний потік та струм у котушці	89
8.3. Магнітний потік розсіяння	90
8.4. Векторна діаграма котушки з осердям	91
8.5. Втрати у сталі щодо змінного намагнічування	92

9. ТРАНСФОРМАТОРИ

9.1. Призначення та принцип роботи	94
9.2. Неробочий (холостий) хід	96
9.3. Режим навантаження	97
9.4. Режим короткого замикання	101
9.5. Втрати у трансформаторах	101
9.6. Досліди неробочого (холостого) ходу та короткого замикання	103
9.7. Реальний, ідеалізований та зведений трансформатори	105

9.8. Схема заміщення трансформатора	107
9.9. Робочі характеристики трансформатора	108
9.10. Конструкція трансформатора	110
9.11. Основні співвідношення для розрахунків	111
9.12. Обчислення трансформатора	113
9.13. Трифазні трансформатори	114
9.14. Багатообмоткові трансформатори	116
9.15. Вимірювальні трансформатори	116
9.16. Автотрансформатори	117
9.17. Зображення трансформаторів на електричних схемах	118
10. АСИНХРОННІ МАШИНИ	
10.1. Будова та принцип роботи	120
10.2. Обертове магнітне поле	122
10.3. Струм та ЕРС короткозамкненої обмотки	124
10.4. Рівняння асинхронного двигуна	126
10.5. Зведення величин і параметрів асинхронних машин	127
10.6. Схема заміщення асинхронної машини	128
10.7. Векторна діаграма асинхронного двигуна	130
10.8. Втрати потужності та ККД асинхронного двигуна	132
10.9. Електромагнітний момент	133
10.10. Механічна характеристика	135
10.11. Робочі характеристики асинхронного двигуна	139
10.12. Двигун із фазним ротором	140
10.13. Регулювання швидкості обертання ротора	142
10.14. Пуск асинхронного двигуна	142
10.15. Асинхронний генератор	144
10.16. Електромагнітне гальмо	146
10.17. Однофазні асинхронні двигуни	147
10.18. Двофазні асинхронні двигуни	148
10.19. Фазообертач	149
10.20. Асинхронний перетворювач частоти	149
10.21. Індукційний регулятор	150
11. СИНХРОННІ МАШИНИ	
11.1. Будова та принцип роботи синхронної машини	152
11.2. Холостий хід синхронного генератора	153
11.3. Реакція якоря синхронної машини	154
11.4. Електромагнітний момент та кутова характеристика машини	154
11.5. Векторна діаграма синхронного генератора	156
11.6. Характеристики синхронних генераторів	157

11.7. U-подібна характеристика синхронного генератора	158
11.8. Паралельна робота синхронних генераторів	158
11.9. Безконтактні синхронні генератори	159
11.10. Характеристики синхронних двигунів	160
11.11. Пуск синхронного двигуна	161
11.12. Синхронні компенсатори	162
11.13. Втрати та ККД синхронної машини	163
11.14. Переваги та недоліки синхронної машини	164
11.15. Графічні позначення синхронних машин	164
12. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
12.1. Будова та принцип роботи	166
12.2. Електрорушійна сила	168
12.3. Електромагнітний момент	169
12.4. Реакція якоря	169
12.5. Комутація	171
12.6. Збудження машин постійного струму	173
12.7. Генератори незалежного збудження	174
12.8. Самозбудження генераторів	176
12.9. Генератори з самозбудженням	177
12.10. Двигуни незалежного та паралельного збудження	179
12.11. Двигуни послідовного збудження	180
12.12. Двигуни змішаного збудження	181
12.13. Регулювання швидкості обертання якоря	182
12.14. Втрати у машинах постійного струму	183
12.15. Колекторні машини змінного струму	185
13. ЕЛЕКТРИЧНІ МІКРОМАШИНИ	
13.1. Класифікація та призначення	188
13.2. Колекторні мікромашини постійного струму	188
13.3. Асинхронні мікромашини	192
13.4. Синхронні мікромашини	195
13.5. Інформаційні мікромашини	199
14. ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	
14.1. Основні визначення	206
14.2. Режими роботи електроприводу	208
14.3. Вибір потужності двигуна	210
14.4. Вибір типу електродвигуна	211
14.5. Керування електроприводом	213
14.6. Електропостачання	214

15. ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАННЯ	
15.1. Класифікація електровимірювальних приладів	218
15.2. Системи електровимірювальних приладів	220
15.3. Вимірювання струмів, напруг, потужностей та енергії	227
15.4. Вимірювання коефіцієнта потужності, послідовності чергування та зсуву фаз, частоти	232
15.5. Вимірювання параметрів електричного кола	235
15.6. Похибки вимірювання та приладів	237
16. ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ТЕХНІКИ	
16.1. Основні положення	242
16.2. Напівпровідникові діоди	243
16.3. Тиристори	243
16.4. Вторинні джерела електроживлення	244
16.5. Випрямлячі	245
16.6. Згладжуючі фільтри	247
16.7. Стабілізатори	248
16.8. Біполярні транзистори	249
16.9. Підсилювачі електричних сигналів	250
16.10. Характеристики та параметри транзисторів	254
16.11. Польові транзистори	256
16.12. Підсилювачі постійного струму	258
16.13. Генератори гармонійних сигналів	259
16.14. Імпульсні пристрої (основні поняття)	261
16.15. Імпульсні підсилювачі	262
16.16. Диференціюючі та інтегруючі ланцюги, лінії затримки	264
16.17. Тригери	266
ЧАСТИНА II. ПРАКТИКУМ	268
1. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	268
2. ПРИКЛАДИ ТА ЗАДАЧІ	349
ДОДАТКИ	421
ЛІТЕРАТУРА	437

ПЕРЕДМОВА

Курс “Загальна електротехніка” є дисципліною фундаментальної підготовки інженерів неелектричних спеціальностей. Ця наука вивчає електричні і магнітні явища, виробництво електричної енергії, передачу, розподіл її між споживачами та перетворення її на інші види енергії. Прикладні розділи дають практичні знання з використання електричної енергії в техніці. Знання електротехніки є необхідною складовою наукового інтелекту інженера, а сама дисципліна – базовою щодо вивчення низки предметів – радіотехніки, обчислювальної техніки та ін.

У підручнику наведені методичні рекомендації по виконанню лабораторних робіт, передбачених навчальними програмами. До кожного розділу пропонуються задачі, до типових із них наведено розв’язок.

Пропонований підручник виник внаслідок багаторічного викладання курсу студентам механічних спеціальностей вищих навчальних закладів та в зв’язку з новими програмами електротехнічних дисциплін для студентів неелектричних спеціальностей. Книга передбачає певний запас необхідних знань, котрі студенти отримують, вивчаючи курси вищої математики та фізики. Тому з книги вилучено дублювання та побічні викладки і зроблено акцент на фізичній сутності процесів в електричних і магнітних колах, електричних машинах і напівпровідникових приладах.

Книгу складено згідно з навчальними планами і програмами підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів механічних спеціальностей вищих навчальних закладів України.

1. Загальні положення

I. ТЕОРЕТИЧНИЙ КУРС

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Основні визначення

1.1.1. *Електричне коло* – це сукупність пристроїв, що генерують, передають, перетворюють та споживають електричну енергію.

1.1.2. Пристрої, призначені для генерування електричної енергії, називаються *джерелами електричної енергії*, або джерелами живлення, або джерелами електрорушійної сили (ЕРС), або джерелами струму.

Джерела живлення бувають:

- машинні (генератори постійного та змінного струму);
- електростатичні (хімічні, сонячні, атомні та інші).

1.1.3. Пристрої, що споживають електричну енергію, називаються *приймачами електричної енергії або навантаженням*.

Приймачами електричної енергії можуть бути:

- привідні електродвигуни різних типів;
- лампи розжарювання, нагрівальні та освітлювальні прилади;
- електрохімічні та радіотехнічні прилади тощо.

1.1.4. *Перетворювачі* електричної енергії можуть розглядатися для різних сторін електричного кола як джерела або як споживачі енергії (наприклад трансформатори).

1.1.5. Кожний пристрій електричного кола має назву *елемента електричного кола*.

1.2. Величини електричного кола

1.2.1. До величин електричного кола належать:

- електричний струм;
- напруга на елементах;
- електрорушійна сила.

1.2.2. **Електричний струм** – це спрямований рух носіїв електричних зарядів.

Прийняті позначення:

I – сила постійного струму;

i – миттєве значення змінного струму.

1.2.3. **Напруга** – це енергія, яку витрачає кожний електричний заряд у приймачі електричної енергії.

Прийняті позначення:

U – постійна напруга;

u – миттєве значення змінної напруги.

1.2.4. **Електрорушійна сила (ЕРС)** – це енергія, яку одержує кожний електричний заряд у джерелі електричної енергії.

ЕРС позначається так:

E – постійна ЕРС;

e – миттєве значення змінної ЕРС.

1.2.5. Умовно-додатні напрями струму, напруги та ЕРС визначаються:

– **умовно-додатний напрям струму** – це напрям руху позитивних зарядів (далі – додатний напрям струму або напрям струму);

– **умовно-додатний напрям напруги** – це напрям зменшення потенціалу (далі – додатний напрям напруги або напрям напруги);

– **умовно-додатний напрям ЕРС** – це напрям дії сторонніх сил у джерелі живлення (далі – додатний напрям ЕРС або напрям ЕРС).

Умовно-додатні напрями струму та ЕРС джерела збігаються. Умовно-додатні напрями струму та напруги на елементах споживача збігаються. Умовно-додатні напрями струму, напруг та ЕРС на схемах позначаються стрілками.

1.3. Параметри електричного кола

1.3.1. До **параметрів** електричного кола належать:

– опір (провідність);

– ємність;

– індуктивність;

– взаємна індуктивність.

1. Загальні положення

1.3.2. **Опір (R)** характеризує спроможність елемента перетворювати електричну енергію на тепло. Інколи замість поняття опору вживається поняття провідності.

1.3.3. **Ємність (C)** характеризує спроможність елемента накопичувати електричні заряди (тобто збуджувати електричне поле).

1.3.4. **Індуктивність (L)** характеризує спроможність елемента збуджувати магнітне поле (перетворювати електричну енергію на магнітне поле).

1.3.5. **Взаємна індуктивність (M)** характеризується впливом індуктивних параметрів один на одного.

1.4. Елементи електричного кола

1.4.1. У загальному випадку кожний **реальний** елемент має R , L та C . Інколи є можливість обмежитися лише одним параметром. Такі елементи називаються **ідеальними**.

Наприклад, ідеальне джерело живлення має тільки E , ідеальний опір – тільки R .

1.4.2. Елементи електричного кола бувають активними та пасивними. Якщо роботу елемента описують за допомогою поняття параметрів (R , L , C та M), цей елемент – **пасивний**. Якщо для опису роботи елемента потрібно вживати поняття величини електричного кола (I , U , E), то цей елемент – **активний**.

До активних елементів належать усі джерела живлення та деякі приймачі (акумулятори, двигуни та ін.).

1.4.3. Джерела живлення утворюють внутрішню ділянку, а приймачі – зовнішню ділянку кола. Ці ділянки відокремлюються полюсами. Ділянка кола, відокремлена двома полюсами, має назву **двополюсника**. Якщо двополюсник містить хоча б один активний елемент, цей двополюсник **активний**. **Пасивний** двополюсник містить тільки пасивні елементи.

1.4.4. Як і двополюсники, ділянки кола також бувають активні та пасивні. Якщо напрямки струму та напруги ділянки кола протилежні, ця ділянка працює у режимі джерела живлення. Якщо напрямки струму та напруги збігаються, ця ділянка працює у режимі приймача електричної енергії.

1.5. Схеми заміщення

1.5.1. Для вивчення процесів в електричних колах складають математичну модель, що містить окремі ідеальні елементи (параметри). Графічне зображення реального кола за допомогою ідеальних елементів, параметрами яких є параметри реальних заміщених елементів, має назву *схеми заміщення*.

1.5.2. Інколи один і той же елемент у схемі заміщення може бути представлений різними параметрами. Таким чином, котушка індуктивності у колі постійного струму характеризується резистивним параметром, у колі змінного струму – параметрами R та L , а у колі високо-частотного струму слід звертатися до параметрів R , L та C .

2. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Передавання потужності від джерела до навантаження

2.1.1. Розрізняють характерні режими роботи джерела живлення:

- номінальний;
- неробочий (або режим холостого ходу);
- короткого замикання;
- узгоджений.

Режим роботи визначається тільки співвідношенням між опором навантаження ($R_{\text{н}}$) та внутрішнім опором джерела живлення (R , рис. 2.1).

Номінальний режим гарантує оптимальні параметри джерела живлення, досить високий ККД, надійність та довговічність.

Неробочий режим – це режим, за якого зовнішнє коло розімкнене. Напруга на клеммах джерела є максимальною і дорівнює ЕРС, струм у колі відсутній. Цей режим також називають *холостим ходом*.

Режим короткого замикання здійснюється тоді, коли опір навантаження дорівнює нулеві ($R_{\text{н}} = 0$). Напруга на приймачі енергії відсутня, струм короткого замикання дуже великий.

Узгоджений режим – це такий режим, за якого у навантаження передається максимальна потужність. При цьому ККД нижчий за ККД у номінальному режимі.

2.1.2. Режими роботи джерела живлення визначаються співвідношенням опорів зовнішнього та внутрішнього кіл. Передавання потужності у навантаження характеризують такі величини:

$P = P(R_{\text{н}} / R)$ – потужність, що розвиває джерело живлення;

$P_{\text{н}} = P_{\text{н}}(R_{\text{н}} / R)$ – потужність, що передається у навантаження;

$\eta = \eta(R_{\text{н}} / R)$ – ККД передавання потужності.

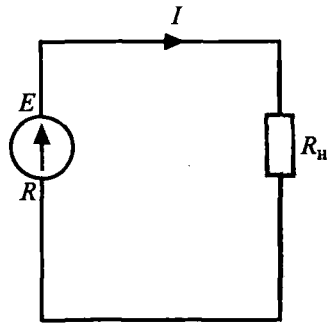


Рис. 2.1

2.1.3. Використовуючи закон Ома для розглянутого кола,

$$I = \frac{E}{R + R_H},$$

потужність, що розвиває джерело живлення, можна описати співвідношенням

$$P = I^2(R + R_H) = \frac{E^2}{R + R_H}.$$

Дослідження співвідношення $P = P(R_H / R)$ у різних режимах роботи показують:

а) у неробочому ($R_H \rightarrow \infty$)

$$I = 0, \quad P = 0;$$

б) у режимі короткого замикання ($R_H = 0$)

$$I = I_k, \quad P = \frac{E^2}{R};$$

в) коли $R_H = R$, ($R_H / R = 1$),

$$P = \frac{E^2}{2R}.$$

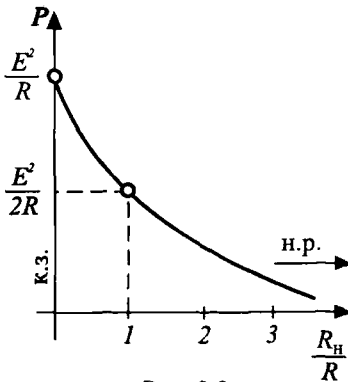


Рис. 2.2

Залежність $P = P(R_H / R)$ наведена на рис. 2.2. Вісь ординат у цьому разі характеризує режим короткого замикання, а неробочий режим (н.р.) визначається нескінченністю на осі абсцис. Коли зовнішній та внутрішній опори рівні, джерело розвиває половину максимальної потужності.

2.1.4. Потужність, що передається у навантаження, має вигляд

$$P_H = I^2 R_H = \frac{E^2 R_H}{(R + R_H)^2}.$$

У межових режимах:

а) неробочому ($R_H \rightarrow \infty$) $P_H = 0;$

2. Кола постійного струму

б) короткого замикання ($R_H = 0$) $P_H = 0$.

Для дослідження $P_H = P_H(R_H/R)$ на екстремум треба продиференціювати вираз $\frac{R_H}{(R + R_H)^2}$ та частинну похідну прирівняти до нуля, тобто

$$\frac{\partial}{\partial R_H} \left[\frac{R_H}{(R + R_H)^2} \right] = \frac{(R + R_H)^2 - 2R_H(R + R_H)}{(R + R_H)^4} = 0.$$

Це буде, коли $R_H = R$. При цьому

$$P_H = \frac{E^2}{4R}.$$

Залежність $P_H = P_H(R_H/R)$ наведена на рис. 2.3.

Максимальна потужність передається у навантаження, коли $R_H = R$ та дорівнює чверті максимальної потужності, що розвивається джерелом живлення у режимі короткого замикання. Цей режим називається *узгодженням (УР)*.

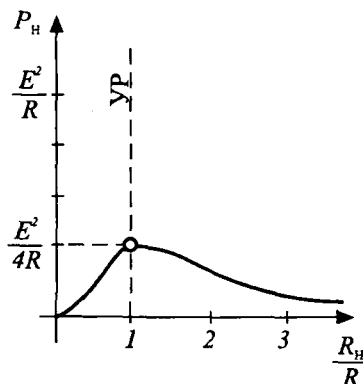


Рис. 2.3

2.1.5. Залежність $\eta = \eta(R_H/R)$ визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_H}{P} = \frac{R_H E^2 (R + R_H)}{(R + R_H)^2 E^2} = \frac{R_H}{R + R_H} = \frac{1}{1 + R/R_H}.$$

Цю залежність наведено на рис. 2.4. ККД процесу залежить тільки від співвідношення опорів.

У межових режимах:

а) неробочому ($R_H \rightarrow \infty$)

$$\eta \rightarrow 1;$$

б) короткого замикання ($R_H = 0$)

$$\eta = 0;$$

в) узгодженому ($R_H = R$)

$$\eta = 0,5.$$

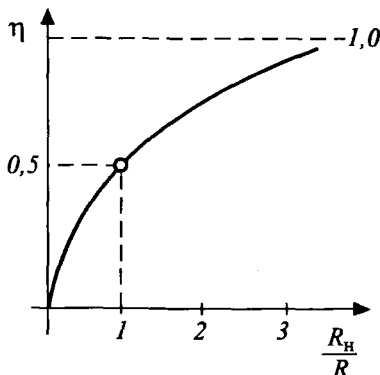


Рис. 2.4

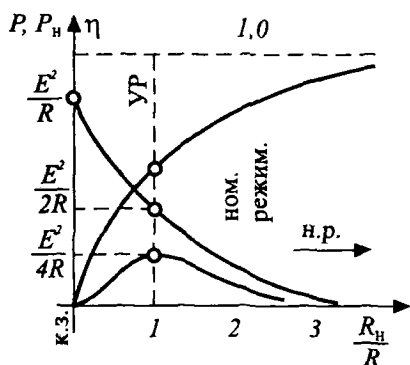


Рис. 2.5

2.1.6. Усі три залежності можна об'єднати одним графіком, який наведено на рис. 2.5. Ці залежності дають повну характеристику особливостей передавання потужності джерела живлення у навантаження.

Номінальний режим забезпечується, коли $R_H > R$. У цьому режимі значна частина потужності передається у навантаження при досить великому ККД ($\eta > 0,5$).

Перевагою цього режиму є велика надійність та довговічність установки.

2.1.7. Режими роботи джерела визначаються співвідношенням R_H / R . Якщо джерело живлення має дуже малий внутрішній опір ($R \rightarrow 0$), таке джерело підтримує порівняно сталу напругу на навантаженні й називається *джерелом ЕРС*.

Є джерела живлення, що мають дуже великий внутрішній опір. Струм у колі з таким джерелом майже не залежить від опору навантаження і підтримується порівняно сталим. Таке джерело називається *джерелом струму*.

2.2. Змішане з'єднання приймачів

2.2.1. Взагалі електричне коло являє собою змішане з'єднання приймачів (тобто послідовне та паралельне з'єднання резисторів).

Якщо коло має тільки *послідовне* з'єднання опорів (рис. 2.6), то еквівалентний опір

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Електричні величини визначають за такими співвідношеннями:

$$I = \frac{U}{R_{\text{екв}}} \text{ — струм у колі,}$$

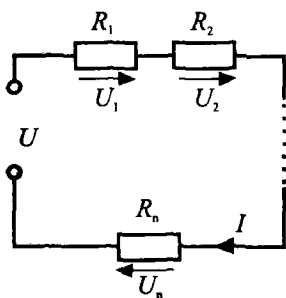


Рис. 2.6

2. Кола постійного струму

$$U_n = R_n \frac{U}{R_{\text{екв}}} - \text{напруга на елементі.}$$

Потужність, що виділяється на елементі,

$$P_n = R_n \frac{U^2}{R_{\text{екв}}^2}.$$

2.2.2. При паралельному з'єднанні приймачів (рис. 2.7)

$$G_{\text{екв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

або

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 R_2 \dots R_n}{R_2 R_3 \dots R_n + R_1 R_3 \dots R_n + \dots + R_1 R_2 \dots R_{n-1}},$$

або

$$R_{\text{екв}} = \frac{1}{G_{\text{екв}}} = R_1 \parallel R_2 \parallel \dots \parallel R_n.$$

Якщо коло має лише три приймачі,

$$R_{\text{екв}} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}.$$

Якщо коло має лише два приймачі,

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$I = \frac{U}{R_{\text{екв}}}, \quad I_n = \frac{U}{R_n}.$$

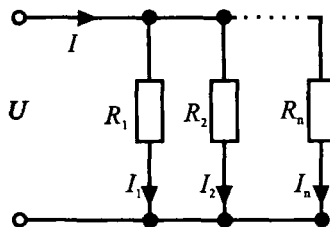


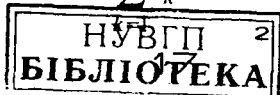
Рис. 2.7

2.3. Застосування законів Кірхгофа

2.3.1. Перший закон Кірхгофа

Алгебраїчна сума струмів вузла електричного кола дорівнює нулеві

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$



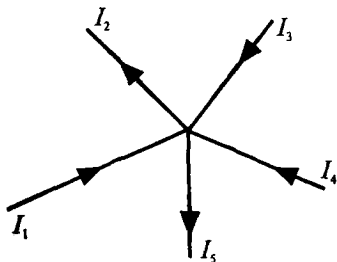


Рис. 2.8

Для вузла, що наведений на рис. 2.8,

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 = 0.$$

2.3.2. Другий закон Кірхгофа

Алгебраїчна сума ЕРС будь-якого замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі напруг на елементах цього контуру

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k.$$

Для кола, наведеного на рис. 2.9,

$$E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_2 R_3 + I_1 R_4;$$

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_5 + I_1 R_4;$$

$$0 = I_2 R_2 + I_2 R_3 - I_3 R_5.$$

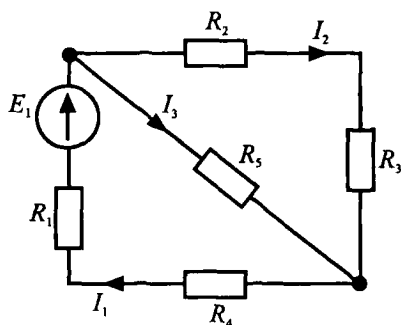


Рис. 2.9

2.3.3. Щоб розрахувати електричне коло за допомогою законів Кірхгофа, треба:

а) у колі довільно призначити напрями струму;

б) скласти рівняння за першим законом Кірхгофа на одне менше, ніж кількість вузлів у колі;

в) рівняння, котрих бракує до повної системи, скласти за другим законом Кірхгофа. Контури треба вибирати таким чином, щоб у кожному була хоча б одна вітка, котра не розглядалася раніше;

г) після визначення струмів треба уточнити дійсний напрям цих струмів.

Приклад. Для розрахунку електричного кола, що наведене на рис. 2.9, можна скласти такі рівняння:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0;$$

$$E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_2 R_3 + I_1 R_4;$$

$$0 = I_2 R_2 + I_2 R_3 - I_3 R_5.$$

2. Кола постійного струму

2.3.4. Из закону збереження енергії випливає поняття *балансу потужностей*.

Потужність усіх джерел живлення електричного кола дорівнює сумі потужностей усіх приймачів цього кола:

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 R_k.$$

Якщо напрямки ЕРС та струму збігаються, то джерело віддає потужність у навантаження. У цьому разі добуток $E_k I_k$ треба брати із знаком "+". Якщо напрямки ЕРС та струму протилежні, то джерело працює у режимі приймача (наприклад, режим зарядження акумулятора). В цьому разі добуток треба брати із знаком "-".

До потужності приймачів треба відносити і потужність, що виділяється на внутрішньому опорі джерела живлення (звичайно у джерелах струму).

2.4. Метод суперпозиції

2.4.1. Якщо коло має кілька джерел живлення, то для обчислення цих кіл можна застосувати *метод суперпозиції (метод накладення)*. Цей метод використовує принцип незалежності дії ЕРС. Струми, які створюються кількома ЕРС, є алгебраїчною сумою струмів, що створюються кожним джерелом окремо. Метод суперпозиції дає змогу замінити обчислення складних кіл розрахунками елементарних кіл з одним джерелом живлення в кожному.

2.4.2. Обчислення складних кіл із кількома джерелами живлення за методом суперпозиції можна здійснити у такий спосіб:

а) складне коло замінюють кількома колами, кожне з яких має одне джерело в елементарному колі, інші замінюють опорами, що дорівнюють внутрішнім опорам джерел;

б) обчислюють елементарні кола, визначаючи величини та напрями струмів у кожній вітці;

в) у кожній вітці знаходять справжні струми як алгебраїчну суму відповідних струмів, тобто доданками справжнього струму є струми цієї вітки в елементарних колах.

Для прикладу можна обчислити коло, наведене на рис. 2.10. У першому випадку розглянемо коло без ЕРС E_2 .

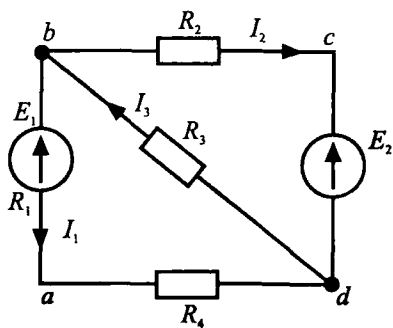


Рис. 2.10

Внутрішній опір цієї ЕРС дорівнює нулеві. Усі струми позначатимемо штрихом, тобто

$$I'_1 = \frac{-E_1}{R_1 + R_4 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}};$$

$$I'_3 = \frac{E_1 + I'_1(R_1 + R_4)}{R_3};$$

$$I'_2 = I'_3 - I'_1.$$

Далі можна розглянути коло без джерела E_1 , але врахувати його внутрішній опір R_1 . Струми позначатимемо двома штрихами:

$$I''_2 = \frac{-E_2}{R_2 + \frac{(R_1 + R_4)R_3}{R_1 + R_3 + R_4}};$$

$$I''_3 = -(E_2 + I''_2 R_2) \frac{1}{R_3};$$

$$I''_1 = I''_3 - I''_2.$$

Справжні струми є сумою відповідних струмів елементарних кіл, тобто:

$$I_1 = I'_1 + I''_1,$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2,$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3.$$

2.5. Метод вузлової напруги

2.5.1. Якщо електричне коло складається *тільки з двох вузлів*, то найпростіше його розрахувати методом вузлової напруги.

На рис. 2.11 напруга U_{ab} спрямована від a до b . Для кожного k -го контуру рівняння за другим законом Кірхгофа має вигляд:

$$E_k = I_k R_k + U_{ab}.$$

2. Кола постійного струму

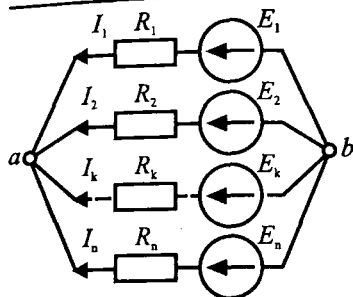


Рис. 2.11

Струм у кожній вітці кола у такому разі:

$$I_k = (E_k - U_{ab})G_k.$$

Якщо скласти рівняння за першим законом Кірхгофа,

$$\sum I_k = 0,$$

тобто
$$\sum I_k = \sum (E_k - U_{ab})G_k = 0,$$

то можна визначити вузлову напругу:

$$U_{ab} = \frac{\sum E_k G_k}{\sum G_k}.$$

2.5.2. Щоб розрахувати коло методом вузлової напруги, треба:

- а) у колі довільно призначити напрями струмів;
- б) визначити вузлову напругу

$$U_{ab} = \frac{\sum E_k G_k}{\sum G_k};$$

добуток у чисельнику береться із знаком "+", якщо напрямок ЕРС не збігається з напрямком вузлової напруги;

в) визначивши вузлову напругу, можна визначити струми у всіх вітках електричного кола:

$$I_k = (E_k - U_{ab})G_k.$$

Якщо струм має від'ємне значення, то дійсний його напрямок є протилежним позначеному на схемі.

2.6. Метод еквівалентних перетворень

2.6.1. Еквівалентним називається таке перетворення, за якого струми у вітках, що не перетворюються, залишаються незмінними (рис. 2.12).

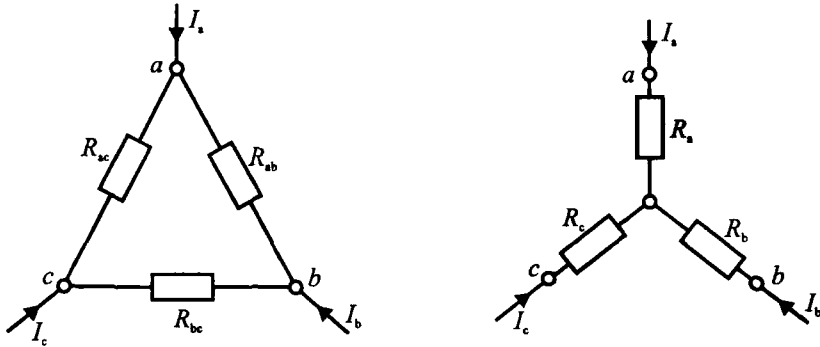


Рис. 2.12

Необхідно знайти залежність між

$$R_{\Delta} = f(R_Y) \text{ та } R_Y = f(R_{\Delta}).$$

Опір між точками a та b (та відповідно між точками b і c , a і c):

$$R_a + R_b = \frac{R_{ab}(R_{bc} + R_{ac})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}},$$

$$R_b + R_c = \frac{R_{bc}(R_{ab} + R_{ac})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}},$$

$$R_c + R_a = \frac{R_{ac}(R_{bc} + R_{ab})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}.$$

Із цієї системи можна визначити

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ac}}{\sum R_{\Delta}}, \quad R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{\sum R_{\Delta}}, \quad R_c = \frac{R_{ac}R_{bc}}{\sum R_{\Delta}},$$

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

2.6.2. Із цієї ж системи можна визначити такі зворотні співвідношення:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c},$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a},$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a R_c}{R_b}.$$

2. Кола постійного струму

2.6.3. У випадку симетричного навантаження перетворення буде еквівалентним, коли

$$R_Y = \frac{R_\Delta}{3}.$$

2.7. Метод контурних струмів

2.7.1. За допомогою законів Кірхгофа принципово можливо розрахувати будь-яке електричне коло. Але у випадку складних розгалужених кіл треба розв'язувати дуже громіздку систему рівнянь. Спростити розрахунки допомагає метод контурних струмів.

2.7.2. Суть методу:

– запроваджується поняття про *контурні струми*, що є фіктивними, умовними (розрахунковими) та замикаються лише на своїх контурах;

– контурні струми зв'язують зі справжніми струмами у вітках (аналітично);

– складається система рівнянь за другим законом Кірхгофа для контурних струмів; кількість контурних струмів значно менша, ніж справжніх, тож зменшується і кількість рівнянь у системі;

– розв'язується система рівнянь та визначаються контурні струми;

– за допомогою аналітичних залежностей визначаються справжні струми.

2.7.3. Приклад (рис. 2.13).

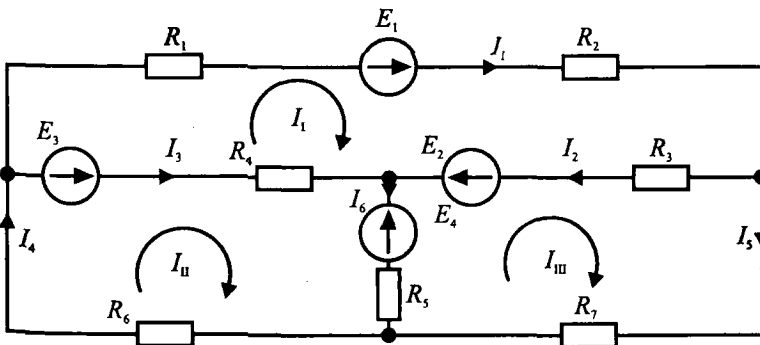


Рис. 2.13

а) розіб'ємо схему по контурах та призначимо напрями контурних струмів (I_I, I_{II}, I_{III});

б) знайдемо зв'язок контурних та справжніх струмів:

$$I_I = I_1, \quad I_{II} = I_4, \quad I_{III} = I_5, \\ I_3 = I_{II} - I_I, \quad I_2 = I_I - I_{III}, \quad I_6 = I_{II} - I_{III};$$

в) складемо систему рівнянь за другим законом Кірхгофа для кожного контуру:

$$(1 \text{ контур}) \quad E_1 + E_2 - E_3 = I_I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) - I_{II}R_4 - I_{III}R_3,$$

$$(2 \text{ контур}) \quad E_3 - E_4 = I_{II}(R_4 + R_5 + R_6) - I_I R_4 - I_{III}R_5,$$

$$(3 \text{ контур}) \quad E_4 - E_2 = I_{III}(R_3 + R_5 + R_7) - I_I R_3 - I_{II}R_5;$$

г) розв'язуємо систему, знаходимо контурні струми та визначаємо справжні струми у вітках.

2.8. Побудова потенційних діаграм

2.8.1. Потенційна діаграма – це графічне зображення зміни потенціалу при обході замкнутого контуру. При цьому по осі абсцис відкладається опір між характерними точками, а по осі ординат – їх потенціали.

2.8.2. Щоб розрахувати коло *методом побудови потенційної діаграми*, треба:

а) розрахувати коло (визначити всі струми, напруги, їх напрямки);
б) коло розбити характерними точками, що розділяють опори та ЕРС;

в) задати напрям обходу;

г) на осі абсцис відкласти опори між характерними точками;

д) на осі ординат відкласти потенціали характерних точок:

– якщо напрям обходу збігається з напрямом ЕРС, то потенціал треба відкладати із знаком “+”;

– якщо напрям обходу збігається з напрямом струму, то потенціал треба відкладати із знаком “-”.

2. Кола постійного струму

2.8.3. **Приклад.** Побудуємо потенційну діаграму контуру $abcd$ (рис. 2.10). Точки c та d знаходяться на одній абсисі, тому що ЕРС є ідеальною (немає внутрішнього опору, рис. 2.14).

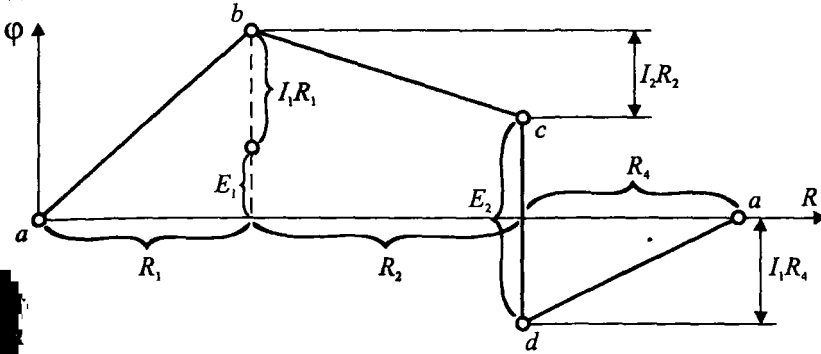


Рис. 2.14

3. НЕЛІНІЙНІ КОЛА

3.1. Загальні визначення

3.1.1. Вольт-амперна характеристика лінійного електричного кола визначається прямою; тангенс кута нахилу до осі струму є пропорційним електричному опору, тобто

$$I = \frac{U}{R}, R = k \operatorname{tg} \alpha.$$

Якщо в електричному колі є елементи, у котрих опір значною мірою залежить від струму або напруги (нелінійні елементи), це коло має назву *нелінійного*. Вольт-амперна характеристика такого кола визначається дослідом і має нелінійний характер.

3.1.2. Нелінійні елементи дають змогу реалізувати процеси, що не можуть проходити у лінійних колах. Наприклад, нелінійні елементи дозволяють стабілізувати напругу та електричний струм, підсилювати струм та інше. Нелінійні елементи бувають керованими та некерованими. Некеровані нелінійні елементи працюють без впливу керуючого чинника (напівпровідникові діоди, термістори та інше). Керовані елементи працюють під впливом керуючих чинників (транзистори, тиристори, електронні лампи та інше).

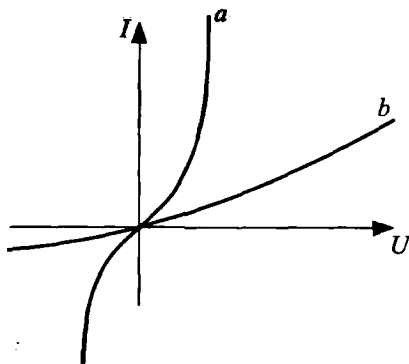


Рис. 3.1

3.1.3. Некеровані лінійні елементи мають одну вольт-амперну характеристику; керовані — сім'ю характеристик. Параметром цих характеристик є керуючий чинник. Характеристики поділяються на симетричні та несиметричні відносно осей координат. На рис. 3.1 характеристика *a* — симетрична, характеристика *b* — несиметрична. Елементи з симетричними характеристиками застосовуються у колах постійного та змінного струму.

3. Нелінійні кола

3.2. Графічний метод розрахунку

3.2.1. Нелінійні кола розраховують двома методами — графічним та аналітичним. Графічний метод застосовується частіше. При графічних розрахунках струм та напруга нелінійного кола визначаються за вольт-амперними характеристиками елементів, що входять у коло.

3.2.2. У нерозгалуженому колі (рис. 3.2) треба визначити вольт-амперну характеристику за характеристиками нелінійних елементів. Взагалі,

$$U = U_1 + U_2,$$

де U_1 — напруга на елементі He_1 ,

U_2 — напруга на елементі He_2 .

Вольт-амперну характеристику кола визначають складанням абсцис вольт-амперних характеристик елементів (рис. 3.3).

3.2.3. У розгалуженому з'єднанні нелінійних елементів (рис. 3.4) за першим законом Кірхгофа,

$$I = I_1 + I_2.$$

Таким чином, вольт-амперну характеристику кола можна визначити складанням вольт-амперних характеристик елементів по осі ординат (рис. 3.5).

3.2.4. Якщо електричне коло має змішане з'єднання нелінійних елементів, розрахунок проводять так:

- визначають вольт-амперні характеристики усіх розгалужених ділянок кола (або нерозгалужених);
- усе коло розглядають як нерозгалужене (або розгалужене).

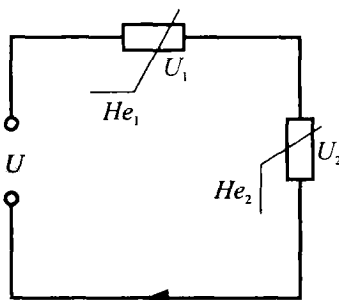


Рис. 3.2

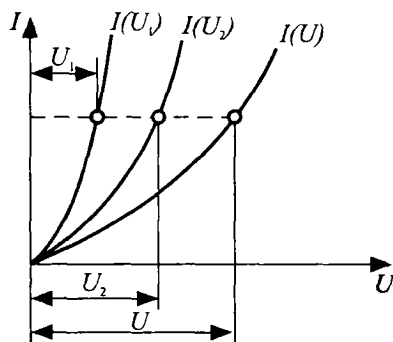


Рис. 3.3

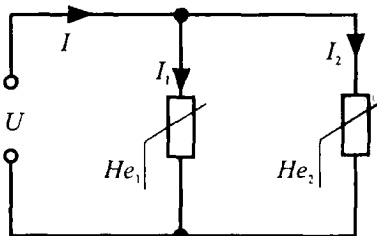


Рис. 3.4

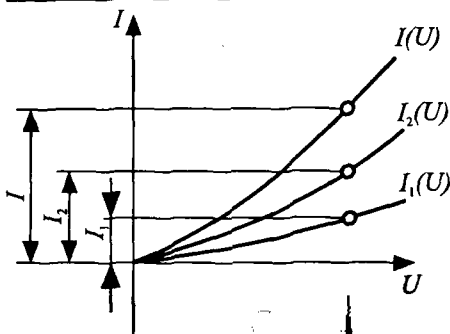


Рис. 3.5

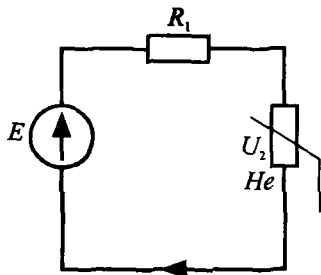


Рис. 3.6

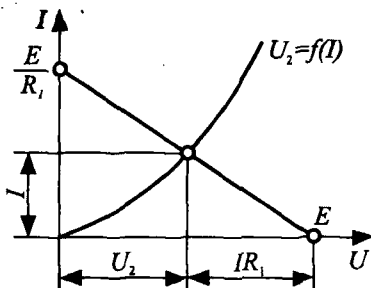


Рис. 3.7

3.2.5. Якщо лінійний елемент з'єднано з нелінійним, вольт-амперну характеристику знаходять тим самим методом (рис. 3.6).

Робочу точку визначають за допомогою другого закону Кірхгофа:

$$E = U_2 + IR_1,$$

де U_2 – напруга на нелінійному елементі.

Це рівняння в координатах I і U зображено прямою. Якщо $I = 0$, то $U_2 = E$, якщо $U_2 = 0$, то

$$I = \frac{E}{R_1}.$$

Робоча точка знаходиться на перетині вольт-амперної характеристики нелінійного елемента та прямої, що визначає рівняння кола (рис. 3.7).

3.3. Аналітичний метод розрахунку

3.3.1. Вольт-амперні характеристики іноді вдається апроксимувати аналітичними виразами. Це дає змогу електричний стан нелінійного кола описати математичними рівняннями. Розв'язування цих систем часто є дуже важким.

3.3.2. Окремі ділянки вольт-амперної характеристики можна розглядати як лінійні (рис. 3.8). Кожний нелінійний елемент має як *статичний*, так і *динамічний* (диференціальний) опір.

3. Нелінійні кола

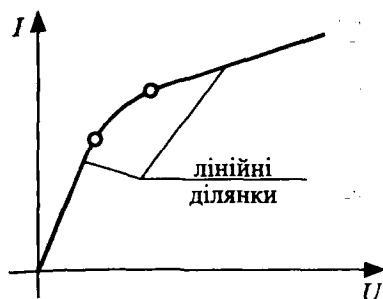


Рис. 3.8

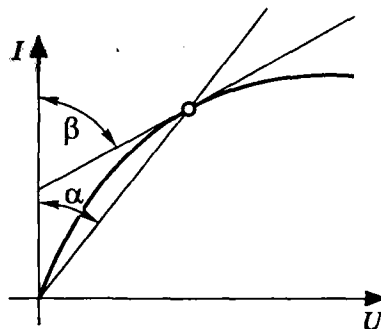


Рис. 3.9

Статичний опір (рис. 3.9) взагалі визначається із закону Ома, тобто:

$$R_{ст} = \frac{U}{I} = k_1 \operatorname{tg} \alpha.$$

Динамічний (диференційний) опір визначається за виразом:

$$R_{\partial} = \frac{dU}{dI} = k_2 \operatorname{tg} \beta.$$

3.3.3. Для аналітичного розрахунку вольт-амперна характеристика поділяється на лінійні ділянки. На цих ділянках коло розраховується як лінійне, що має опір:

$$R = R_{\partial} = \frac{dU}{dI}.$$

4. КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

4.1. Основні визначення

4.1.1. Як джерела живлення в техніці використовуються машинні та безмашинні перетворювачі електричної енергії. Генератори змінного струму простіші у виготовленні, надійніші та дешевіші за генератори постійного струму. Вони не мають колектора, що потребує постійного регулювання та спеціального обслуговування. Часто вживаються дуже прості та надійні двигуни змінного струму, особливо асинхронні двигуни.

4.1.2. Використання електричних кіл змінного синусоїдного струму забезпечує стабілізовану частоту обертання у приводах приладів та агрегатів. Використовуючи електричний струм підвищеної частоти, можна здобути дуже великі швидкості обертання і набагато зменшити масу і габарити основних елементів електрообладнання. Ще однією перевагою кіл змінного струму є можливість його трансформування.

4.1.3. Миттєве значення синусоїдної величини визначається такими формулами:

$$\begin{aligned}i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i), \\e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e), \\u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u),\end{aligned}$$

де I_m, E_m, U_m — амплітуди струму, ЕРС і напруги,

ω — кутова частота,

ωt — фазовий кут,

ψ_i, ψ_e, ψ_u — початкові фази струму, ЕРС та напруги.

Кутова частота зв'язана з лінійною співвідношенням:

$$\omega = 2\pi f,$$

а період $T = \frac{1}{f}$.

4. Кола синусоїдного струму

4.2. Діюче значення синусоїдних величин

4.2.1. Щоб характеризувати теплову та електродинамічну дію синусоїдного струму, запроваджують поняття діючого значення синусоїдного струму.

Діючим значенням синусоїдного струму є значення такого постійного струму, що виробляє еквівалентну змінному теплову чи механічну дію.

Теплова дія постійного струму за час одного періоду є:

$$Q = I^2 RT.$$

За цей самий час у тому ж опорі змінний струм діючого значення виробляє ту ж кількість тепла, тобто:

$$Q = \int_0^T i^2 R dt.$$

У такому разі діюче значення змінного струму можна визначити із співвідношення:

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt,$$

тобто
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Діюче значення синусоїдної величини є середньоквадратичне значення цієї величини за період. Якщо струм змінюється за синусоїдою, тобто

то
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}.$$

З урахуванням того, що $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$, $\int_0^T dt = T$, $\int_0^T \cos 2\omega t dt = 0$,

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

4.2.2. Діюче значення синусоїдної величини у $\sqrt{2}$ разів менше, ніж її амплітудне значення

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

4.2.3. Перший та другий закони Кірхгофа слухні для миттєвих значень струмів та ЕРС, тобто

$$\sum i = 0, \quad \sum Ri = \sum e.$$

4.3. Метод векторних діаграм

4.3.1. Метод векторних діаграм дає змогу замінити алгебраїчне складення синусоїдних величин геометричними діями над векторами відповідно до правил векторного аналізу.

4.3.2. Суть методу векторних діаграм:

- кожній синусоїдній величині відповідає вектор цієї величини;
- напрям вектора визначається початковою фазою;
- модуль вектора синусоїдної величини є пропорційним до діючого значення або амплітуди цієї величини;
- вектори синусоїдних величин однакової кутової частоти можна складати геометрично, як звичайні вектори.

Додатний напрям кута відрховується проти ходу годинникової стрілки.

4.3.3. Таким чином, якщо треба визначити струм:

$$i = i_1 + i_2.$$

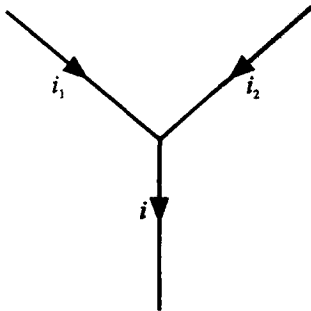


Рис. 4.1

Згідно з першим законом Кірхгофа (рис. 4.1), можна провести такі алгебраїчні дії:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{1m} \sin \omega t, \\ i_2 &= I_{2m} \sin(\omega t + \alpha), \\ i &= I_m \sin(\omega t + \beta). \end{aligned}$$

Амплітуду та початкову фазу струму визначити дуже важко. Відповідно до методу векторних діаграм цей струм простіше

4. Кола синусоїдного струму

визначити за допомогою **векторної діаграми**, що обов'язково будується у масштабі (рис. 4.2).

4.4. Символічний метод

4.4.1. Для розрахунку кіл синусоїдного струму застосовується також символічний метод.

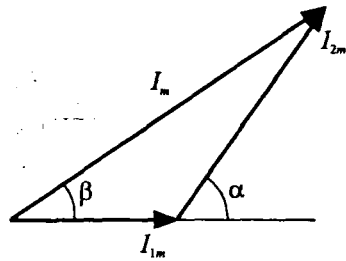


Рис. 4.2

Символічний метод дає змогу геометричні дії над векторами замінити алгебраїчними. При цьому розрахунки кіл змінного струму проводять у такий же спосіб, що й кіл постійного струму.

4.4.2. Суть символічного методу:

а) кожний вектор \dot{i} розкладається на складові I' та I'' на осях прямокутної системи координат (рис. 4.3);

б) вісь абсцис називають віссю дійсних значень та позначають знаками "+" та "-". Вісь ординат називають віссю уявних значень. Складову вектора за уявною віссю виділяють особливим символом j . Тому метод називається символічним. Вектор

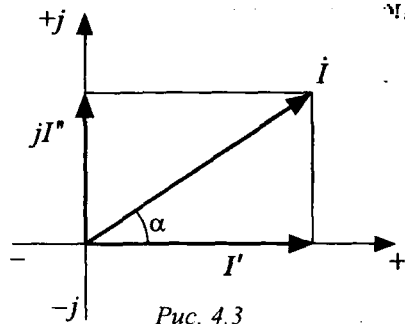


Рис. 4.3

$$\dot{i} = I' + jI'';$$

в) множення кожного вектора на символ j повертає цей вектор на 90° проти ходу годинникової стрілки. Множення на j^2 повертає вектор на 180° , тобто

$$j^2 \dot{U} = -\dot{U},$$

звідки $j = \sqrt{-1}$. Символ j — це уявна одиниця;

г) вектор розглядається як величина комплексна на комплексній площині. Тому метод має також назву **метода комплексних величин**.

4.4.3. Діючі значення у комплексній формі записуються основним літерним позначенням, над яким ставлять крапку. Застосовують три форми запису комплексних величин:

а) алгебраїчна форма

$$\dot{i} = I' + jI'';$$

б) тригонометрична форма

$$\dot{I} = I(\cos \alpha + j \sin \alpha);$$

в) показникова форма

$$\dot{I} = Ie^{j\alpha}.$$

Останнє випливає з формули Ейлера

$$\cos \alpha + j \sin \alpha = e^{j\alpha}.$$

Для переходу від однієї форми до іншої застосовуються співвідношення:

$$I = \sqrt{I'^2 + I''^2},$$

$$\alpha = \arctg \frac{I''}{I'},$$

де I – модуль комплексу, α — початкова фаза.

4.5. Активний опір у колі синусоїдного струму

4.5.1. Якщо на синусоїдну напругу

$$u = U_m \sin \omega t$$

увімкнути резистивний елемент (рис. 4.4), то у колі виникне миттєвий струм:

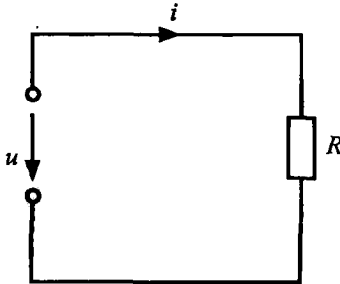


Рис. 4.4

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

4.5.2. Таким чином, можна зробити висновок, що *струм у колі з активним опором, увімкнутим на синусоїдну напругу, є синусоїдним та збігається з напругою за фазою.*

4.5.3. Векторна діаграма такого кола зображена на рис. 4.5.

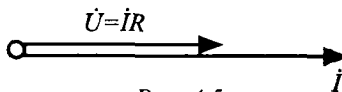


Рис. 4.5

Вектор струму збігається за напрямом із вектором напруги (зсув за фазою дорівнює нулю). Ці дві електричні величини мають лише дійсне значення.

4. Кола синусоїдного струму

4.5.4. Закон Ома для такого кола через амплітудні значення, діючі значення та в комплексній формі має вигляд:

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad I = \frac{U}{R}, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{R}.$$

4.5.5. Необхідно враховувати збільшення опору провідників змінного струму, що пов'язано з явищем витиснення струму на поверхню провідника. Поверхневий ефект враховується введенням коефіцієнта

$$\xi = \frac{R}{R_0},$$

де R — опір провідника до постійного струму,
 R_0 — опір цього ж провідника до змінного струму.

4.6. Індуктивність у колі змінного струму

4.6.1. Якщо у колі з індуктивним елементом протікає синусоїдний струм:

$$i = I_m \sin \omega t,$$

то ЕРС самоіндукції:

$$e = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t.$$

За другим законом Кірхгофа:

$$u + e = 0,$$

напругу можна записати співвідношенням

$$u = \omega L I_m \cos \omega t$$

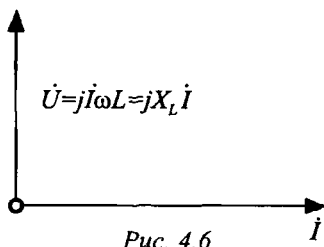
або

$$u = U_m \cos \omega t,$$

де $U_m = I_m \omega L$.

4.6.2. Таким чином, *при вмиканні індуктивності на синусоїдну напругу струм у колі залишається синусоїдним і відстає від напруги на чверть періоду.*

4.6.3. Величина $X_L = \omega L$ має розмірність опору і називається **індуктивним опором**. Індуктивний опір відрізняється від активного і має назву реактивного опору. Комплексний індуктивний опір визначається співвідношенням:



$$jX_L = j\omega L.$$

4.6.4. Векторна діаграма цього кола наведена на рис. 4.6. Вектор напруги випереджає вектор струму на 90° (символ j показує, що вектор струму треба повернути на чверть періоду проти ходу годинникової стрілки).

4.6.5. Закон Ома для кола з індуктивним елементом через амплітудні, діючі значення та в комплексній формі має вигляд:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}, \quad I = \frac{U}{X_L}, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{jX_L}.$$

4.7. Ємність у колі синусоїдного струму

4.7.1. Якщо коло синусоїдного струму містить ідеальний ємнісний елемент, то струм змінюється за законом:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}.$$

Якщо

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то

$$i = \omega C U_m \cos \omega t,$$

або

$$i = I_m \cos \omega t,$$

де

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}.$$

4.7.2. При вмиканні ємності на синусоїдну напругу у колі встановлюється синусоїдний струм, що випереджає напругу на чверть періоду.

4. Кола синусоїдного струму

4.7.3. Величина $X_C = 1/\omega C$ має розмірність опору та називається ємнісним опором. Ємнісний опір, як і індуктивний, є реактивним опором. Індуктивний опір $X_L = \omega L$ підвищується з підвищенням частоти струму та індуктивності елемента. Індуктивність у колі постійного струму не має реактивного опору. Ємнісний опір $X_C = 1/\omega C$ постійному струму дорівнює нескінченності і зменшується при підвищенні частоти змінного струму та ємності елемента.

4.7.4. Векторна діаграма кола з ємністю наведена на рис. 4.7. Помноження вектора струму на $-j$ відповідає повороту цього вектора на 90° за ходом годинникової стрілки.

4.7.5. Закон Ома для кола синусоїдного струму, що містить лише ємнісний опір, має вигляд:

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}, \quad I = \frac{U}{X_C}, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{-jX_C}.$$

4.8. Нерозгалужені кола

4.8.1. При послідовному з'єднанні елементів (рис. 4.8) мають місце такі співвідношення для миттєвих значень та комплексів напруг:

$$u = u_R + u_L + u_C, \\ \dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Оскільки $\dot{U}_R = \dot{I}R$, $\dot{U}_L = j\dot{I}X_L$, $\dot{U}_C = -j\dot{I}X_C$, векторна діаграма має вигляд, наведений на рис. 4.9.

4.8.2. Із векторної діаграми можна записати вираз щодо комплексу напруги:

$$\dot{U} = \dot{I}[R + j(X_L - X_C)],$$

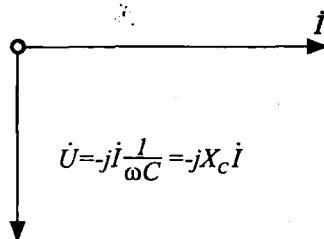


Рис. 4.7

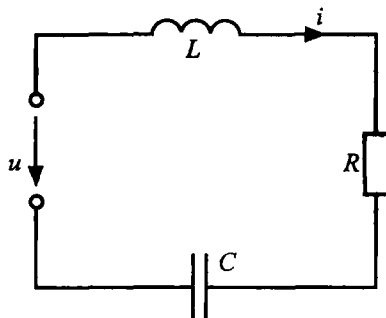


Рис. 4.8

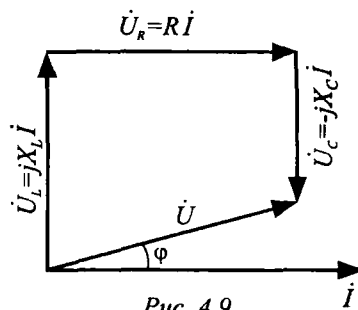


Рис. 4.9

або
$$i = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}$$

Різницю $X = X_L - X_C$ називають реактивним опором, що в комплексній формі має вигляд:

$$jX = j(X_L - X_C).$$

Вирази

$$\underline{Z} = R + jX,$$

або
$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi},$$

або
$$\underline{Z} = Z(\cos\varphi + j\sin\varphi)$$

називають повним опором у комплексній формі. Модуль повного опору можна виразити як

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

а φ – кут між струмом та напругою визначається за співвідношенням:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

4.8.3. Прямокутний трикутник на векторній діаграмі можна перетворити на **трикутник опорів** (рис. 4.10). З трикутника опорів випливають такі співвідношення:

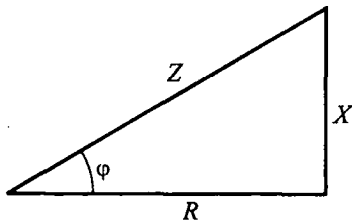


Рис. 4.10

Або

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

$$R = Z \cos\varphi,$$

$$X = Z \sin\varphi,$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Зсув фаз (φ) вважають позитивним, коли $\omega L > 1/\omega C$.

4.8.4. Закон Ома для діючих значень та у комплексній формі для нерозгалуженого кола має вигляд:

4. Кола синусоїдного струму

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \quad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}},$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \quad I = \frac{U}{Z}.$$

$$\underline{i} = \frac{\underline{U}}{R + jX}, \quad \underline{i} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}.$$

4.8.5. Розрахунок нерозгалуженого кола символічним методом можна виконувати так само, як і обчислення кола постійного струму. Якщо є коло (рис. 4.11) і треба визначити повний опір, то можна записати співвідношення:

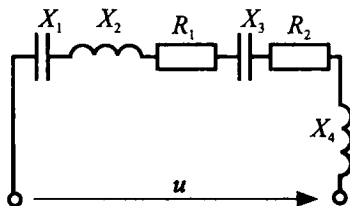


Рис. 4.11

$$\underline{Z} = R_1 + R_2 + j(X_2 + X_4) - j(X_1 + X_3).$$

Отже, всі індуктивні опори помножуються на символ “+j”, а усі ємнісні опори помножуються на символ “-j”. Якщо

$$R_1 = 3, R_2 = 2, X_1 = 1, X_2 = 3, X_3 = 2, X_4 = 4,$$

то

$$\underline{Z} = 3 + 2 + j(3 + 4) - j(1 + 2)$$

$$\underline{Z} = 5 + 4j.$$

Із цього випливає, що все коло можна замінити еквівалентним опором. Цей опір складається із дійсної частини (активний опір 5 Ом) та уявної частини (індуктивний реактивний опір дорівнює 4 Ом).

4.9. Розгалужені електричні кола

4.9.1. При паралельному з'єднанні елементів (рис. 4.12) рівняння, за першим законом Кірхгофа, для миттєвих значень та у комплексній формі мають такий вигляд:

$$i = i_R + i_L + i_C,$$

$$\underline{i} = \underline{i}_R + \underline{i}_L + \underline{i}_C.$$

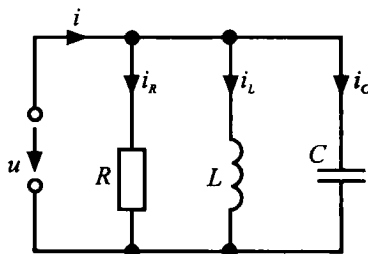


Рис. 4.12

Через провідності

- g — активну,
- b_L — реактивну індуктивну,
- b_C — реактивну емнісну

струми можна записати у символічному вигляді:

$$\begin{aligned} i_R &= g\dot{U}, \\ i_L &= -jb_L\dot{U}, \\ i_C &= jbc\dot{U}. \end{aligned}$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, векторна діаграма має вигляд, наведений на рис. 4.13.

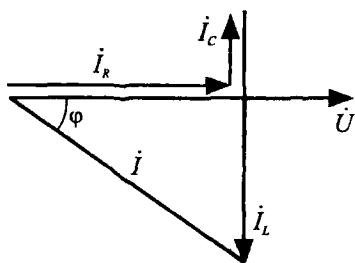


Рис. 4.13

де модуль повної провідності

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2},$$

а зсув фаз між струмом та напругою

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g}.$$

4.9.3. Прямокутний трикутник векторної діаграми можна перетворити на трикутник провідностей (рис. 4.14). Із цього трикутника випливають співвідношення між провідностями:

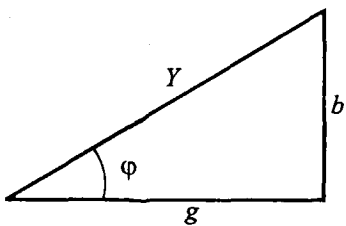


Рис. 4.14

$$\begin{aligned} Y &= \sqrt{g^2 + b^2}, \\ g &= Y \cos \varphi, \\ b &= Y \sin \varphi, \\ \varphi &= \arctg \frac{b}{g}. \end{aligned}$$

4. Кола синусоїдного струму

4.9.4. Прямокутний трикутник векторної діаграми дає також співвідношення:

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

Це співвідношення є законом Ома в алгебраїчній формі для розгалуженого кола. Закон Ома у символічному вигляді має форму:

$$\underline{I} = \underline{Y}\underline{U}$$

або

$$i = YUe^{-j\varphi}.$$

4.9.5. Для розрахунку розгалуженого кола (рис. 4.15) можна використати символічний метод, тобто:

$$\underline{Z} = \frac{R_1(-jX_1)(jX_2)}{R_1(-jX_1) + (-jX_1)(jX_2) + R_1(jX_2)}.$$

Якщо $R_1 = 3$, $X_1 = 2$, $X_2 = 4$, то

$$\underline{Z} = \frac{24}{-6j + 8 + 12j} = \frac{48}{25} - \frac{36}{25}j.$$

У наведеному колі активний опір складає $48/25$ Ом, реактивний (ємнісний) опір — $36/25$ Ом.

4.9.6. При змішаному з'єднанні елементів спочатку розраховують розгалужені ділянки, а потім усе коло розглядають як нерозгалужене (або навпаки). Таким чином, якщо треба визначити повний опір кола, наведеного на рис. 4.16, можна використати символічний метод:

$$\underline{Z} = R_1 - jX_1 + \underline{Z}_{\text{екв}},$$

$$\underline{Z}_{\text{екв}} = \frac{(R_2 - jX_2)(R_3 + jX_3)}{R_2 + R_3 + j(X_3 - X_2)}.$$

Якщо $R_1 = 3$, $X_1 = 2$, $R_2 = 1$, $X_2 = 4$, $R_3 = 2$, $X_3 = 3$, то

$$\underline{Z}_{\text{екв}} = 4,7 - 0,1j.$$

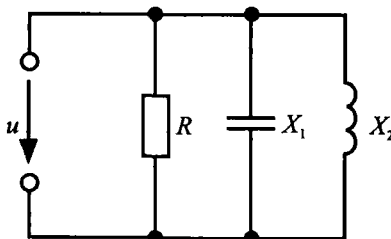


Рис. 4.15

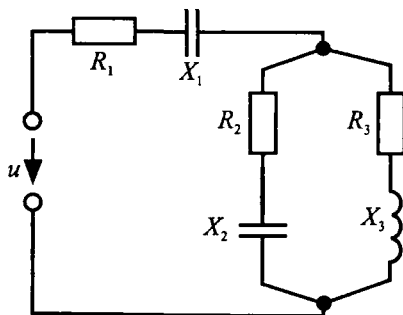


Рис. 4.16

Повний опір можна визначити як

$$\underline{Z} = 3 - 2j + 4,7 - 0,1j = 7,7 - 2,1j.$$

Отже, повний опір складається з активного (7,7 Ом) та ємнісного (2,1 Ом) опору.

4.10. Трикутники опорів та провідностей. Співвідношення між опорами та провідностями

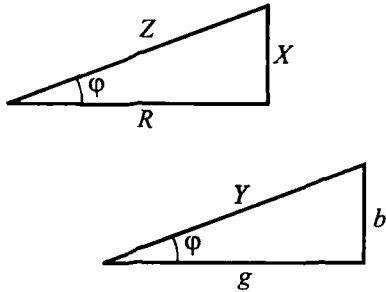


Рис. 4.17

4.10.1. Трикутники опорів та трикутники провідностей будують перетворенням векторних діаграм (рис. 4.17). Для трикутника опорів мають місце співвідношення:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

$$R = Z \cos \varphi,$$

$$X = Z \sin \varphi,$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R},$$

а для трикутника провідностей —

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2},$$

$$g = Y \cos \varphi,$$

$$b = Y \sin \varphi,$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{g}.$$

4.10.2. Кут φ (зсув фаз між струмом та напругою) однаковий у цих трикутниках, тобто *ці трикутники подібні*. За визначенням завжди

$$Y = 1/Z,$$

тому можна скласти співвідношення між опорами та провідностями

$$R/Z = g/Y \text{ та інші.}$$

Вирази провідностей через опори мають такий вигляд:

$$Y = 1/Z,$$

$$g = R/Z^2,$$

$$b = X/Z^2.$$

4. Кола синусоїдного струму

Вирази опорів через провідності мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} Z &= 1/Y, \\ R &= g/Y^2, \\ X &= b/Y^2. \end{aligned}$$

4.10.3. Завжди мають місце співвідношення у символічному вигляді:

$$\begin{aligned} \underline{Y} &= \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X}{Z^2} = g - jb, \\ \underline{Z} &= \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{g - jb} = \frac{g}{g^2 + b^2} + j \frac{b}{g^2 + b^2} = \frac{g}{Y^2} + j \frac{b}{Y^2} = R + jX. \end{aligned}$$

4.10.4. Повний опір називають *імпедансом* електричного кола. Активний опір називають *резистансом*, реактивний — *реактансом*. Реактанс буває *індуктивним* (індуктивний опір) та *ємнісним* (ємнісний опір). Повну провідність називають *адмітансом* електричного кола. Активну провідність називають *кондуктансом*, реактивну — *сусцептансом*. Сусцептанс буває *індуктивним* (індуктивна провідність) та *ємнісним* (ємнісна провідність).

4.11. Потужність кола синусоїдного струму

4.11.1. Миттєва потужність кола синусоїдного струму визначається добутком миттєвого струму та миттєвої напруги:

$$p = iu.$$

4.11.2. *Потужність у символічному вигляді визначається добутком комплексу напруги та спряженого комплексу струму*, тобто

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^*.$$

Якщо

$$\dot{U} = Ue^{j\psi_u}, \quad \dot{I} = Ie^{j\psi_i}, \quad \dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i},$$

то $\varphi = \psi_u - \psi_i$ (зсув фаз), а

$$\underline{S} = UIe^{-j\varphi}.$$

Це вираз повної потужності у показниковій формі. Можна потужність визначити в алгебраїчній та тригонометричній формах:

$$\underline{S} = S \cos \varphi + jS \sin \varphi,$$

$$\underline{S} = P + jQ,$$

де $S = UI$ — модуль повної потужності,

P — активна потужність,

Q — реактивна потужність.

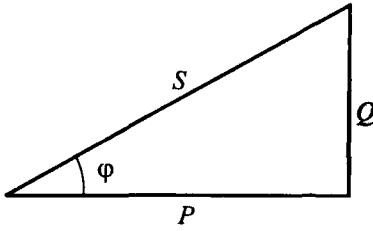


Рис. 4.18

4.11.3. Трикутник потужностей має вигляд, наведений на рис. 4.18. Цей трикутник дає співвідношення:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

$$P = S \cos \varphi,$$

$$Q = S \sin \varphi,$$

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}.$$

4.11.4. Таким чином, повна потужність є величина комплексна. Активна потужність є дійсною частиною повної потужності, реактивна — уявною частиною повної потужності. Якщо є кілька приймачів електричної енергії, то співвідношення для повної потужності має вигляд:

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q_L - \sum Q_C)^2}.$$

4.11.5. **Баланс потужностей** можна визначити рівнянням:

$$\underline{S}_{дж} = \underline{S}_{прийм},$$

де $\underline{S}_{дж}$ — потужність усіх джерел живлення,

$\underline{S}_{прийм}$ — потужність усіх приймачів кола,

тобто

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k \dot{I}_k^* = \sum_{k=1}^m I_k^2 \underline{Z}_k.$$

Треба пам'ятати, що добуток $\dot{U}_k \dot{I}_k^*$ береться зі знаком «—», коли напруга та струм джерела протилежні за напрямком. Якщо джерело працює у режимі приймача (струм та напруга збігаються за напрямком), добуток $\dot{U}_k \dot{I}_k^*$ треба брати додатним.

Внутрішній опір джерела живлення (зазвичай джерела струму) вважають звичайним приймачем електричної енергії.

4.12. Коефіцієнт потужності.

Підвищення коефіцієнта потужності

4.12.1. Активна потужність визначається співвідношенням:

$$P = S \cos \varphi.$$

У цьому виразі $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності. Він характеризує ступінь використання електричної енергії. Тому дуже важливим стає питання підвищення коефіцієнта потужності.

4.12.2. На рис. 4.19 зображена типова схема енергоспоживання літального апарата або промислового підприємства. Більшість потужних приймачів (привідні двигуни) мають індуктивний характер.

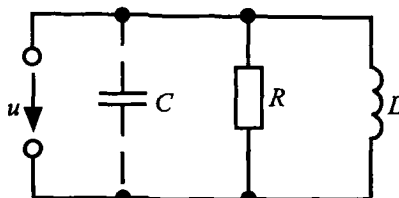


Рис. 4.19

Векторна діаграма такого кола без ємності наведена на рис. 4.20. Для того, щоб зменшити зсув фаз (підвищити коефіцієнт потужності), звичай паралельно приймачеві вмикають батарею конденсаторів. У цьому випадку векторна діаграма змінюється, зменшуються реактивний струм I_X , кут між струмом і напругою.

Можна визначити додаткову ємність, необхідну для зменшення зсуву фаз від φ_1 до φ :

$$I_X = I_L - I_C,$$

$$I_X = I_R \operatorname{tg} \varphi,$$

$$I_L = I_R \operatorname{tg} \varphi_1,$$

$$I_C = U \omega C,$$

$$I_R \operatorname{tg} \varphi = I_R \operatorname{tg} \varphi_1 - U \omega C,$$

звідки

$$C = \frac{I_R}{\omega U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

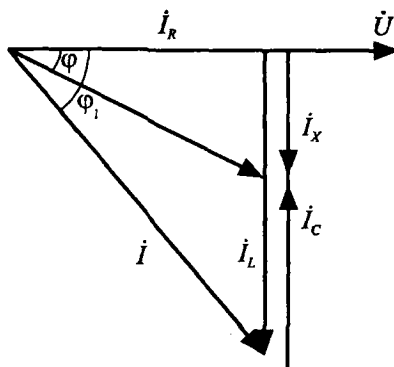


Рис. 4.20

Якщо використати залежність $P = I_R U$, додаткову ємність можна визначити співвідношенням:

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

4.13. Явище резонансу

4.13.1. Закон Ома для нерозгалуженого кола (рис. 4.8) має вигляд:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

У разі виконання умови

$$\omega L = 1/\omega C$$

має місце явище *резонансу напруги*.

При незмінних параметрах L та C умову резонансу можна виконати зміною частоти струму. Резонансну частоту визначають:

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C,$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

У разі резонансу напруги на індуктивності та ємності рівні. Векторна діаграма цього випадку наведена на рис. 4.21. У разі резонансу:

$$\varphi = 0,$$

$$\cos \varphi = 1,$$

$$U = IR,$$

$$S = P.$$

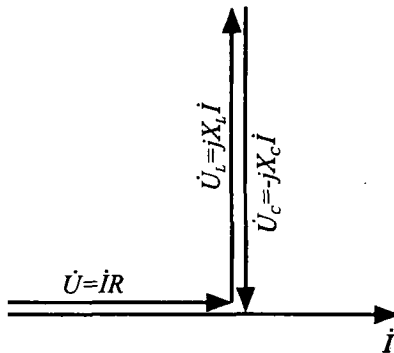


Рис. 4.21

Якщо активний опір малий, то виникає значний струм та великі напруги на ємності та індуктивності, що можуть бути значно більшими, ніж напруга мережі. Це буде, коли

$$R < 1/\omega C, \text{ та } R < \omega L.$$

Величину реактивного опором при резонансній частоті називають хвильовим опором (ρ):

$$\rho = \omega_0 L = \frac{L}{\sqrt{LC}};$$

$$\rho = \sqrt{L/C}.$$

Добротністю контуру (Q) називають відношення хвильового опором до активного, тобто

$$Q = \frac{\rho}{R}.$$

4. Кола синусоїдного струму

Добротність визначає, у скільки разів напруга на реактивних елементах перевершує напругу на резистивному елементі.

Враховуючи, що

$$X_L = \omega L,$$

$$X_C = 1/\omega C,$$

$$X = X_L - X_C,$$

можна побудувати частотну характеристику (рис. 4.22). Резонансні криві (залежності $I = f(\omega)$ та $\cos\varphi = f(\omega)$) наведені на рис. 4.23. Під час резонансу струм у колі сягає максимального значення, а коефіцієнт потужності дорівнює одиниці.

4.13.2. Закон Ома для розгалуженого кола (рис. 4.15) має вигляд:

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

Якщо $b_L = b_C$ то має місце явище **резонансу струмів**. У цьому разі струми у вітках із реактивними елементами рівні і повернені у протилежні боки (векторна діаграма наведена на рис. 4.24). Струми у вітках з реактивними елементами можуть значно перевищувати струм у нерозгалуженій ділянці кола.

Як і при резонансі напруг, при резонансі струмів мають місце співвідношення:

$$\varphi = 0,$$

$$\cos\varphi = 1,$$

$$S = P,$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

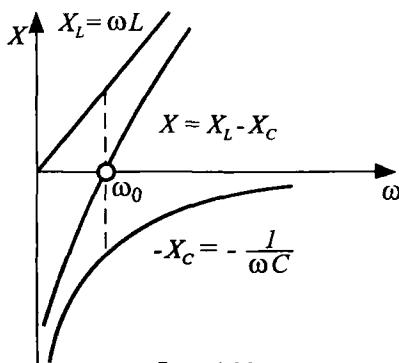


Рис. 4.22

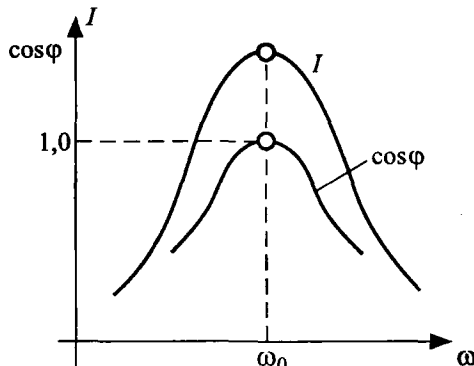


Рис. 4.23

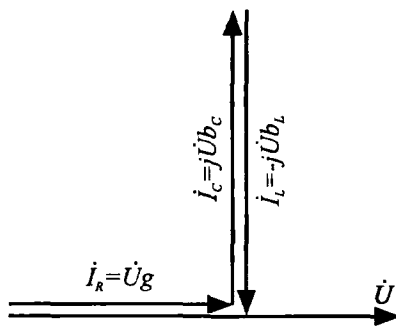


Рис. 4.24

При резонансі напруг користуються поняттям *хвильової провідності кола* (γ):

$$\gamma = \frac{1}{\omega_0 L} = \omega_0 C = \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Добротність кола в цьому разі:

$$Q = \frac{\gamma}{g}$$

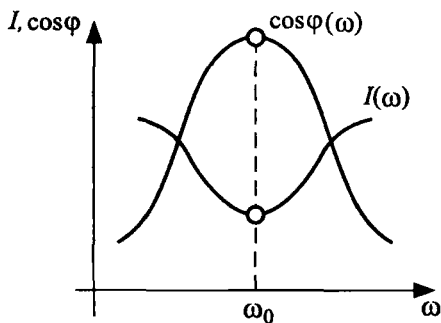


Рис. 4.25

і показує, у скільки разів струм у вітках із реактивними елементами перевищує струм у нерозгалуженій ділянці кола. Резонансні криві наведені на рис. 4.25.

Струм у нерозгалуженій ділянці кола в момент резонансу набуває мінімального значення, а коефіцієнт потужності дорівнює одиниці.

4.14. Чотириполюсники

4.14.1. Ділянка електричного кола, що має два вхідних і два вихідних полюси (затискачі), називається *чотириполюсником*.

Чотириполюсники бувають *активними* (з джерелами ЕРС усередині) і *пасивними*. У схемі пасивного чотириполюсника можуть бути ЕРС, але вони повинні взаємно компенсуватися.

До активних чотириполюсників належать різні підсилювачі, мостові схеми, що вміщують джерела енергії. До пасивних чотириполюсників належать трансформатори, лінії електропередач, фільтри тощо.

На схемі заміщення чотириполюсник позначається прямокутником. Активний чотириполюсник позначається літерою *A*.

4.14.2. Чотириполюсник може бути *симетричним*, коли при зміні вхідних полюсів вихідними режим роботи зовнішніх кіл не змінюється. В інших випадках чотириполюсник є *несиметричним*.

4. Кола синусоїдного струму

На рис. 4.26 наведено пасивний чотириполосник. Розрізняють вхідний і вихідний опори чотириполосника.

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}, \quad \underline{Z}_{\text{вих}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2},$$

де $\underline{Z}_{\text{вх}}$ — вхідний опір, $\underline{Z}_{\text{вих}}$ — вихідний опір чотириполосника.

Взаємні опори визначаються так:

$$\underline{Z}_{21} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}, \quad \underline{Z}_{12} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}.$$

Якщо взаємні опори рівні, то пасивні чотириполосники усі оборотні.

4.14.3. Будь-який пасивний чотириполосник може відповідати схемам заміщення: Т-, П-, Г-подібній (рис. 4.27). Можна довести, що у кожній із наведених схем між напругою і струмом приймача (\dot{U}_2, \dot{I}_2) та напругою і струмом джерела (\dot{U}_1, \dot{I}_1) існує лінійна залежність.

4.14.4. Якщо розглянути Т-подібну схему, то за першим законом Кірхгофа а враховуючи

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2,$$

$$\dot{I}_0 = (\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2) \frac{1}{\underline{Z}_0},$$

можна дістати залежність

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_0} \dot{U}_2 + \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0}\right) \dot{I}_2.$$

Напруга на вході чотириполосника за рівнянням другого закону Кірхгофа

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1.$$

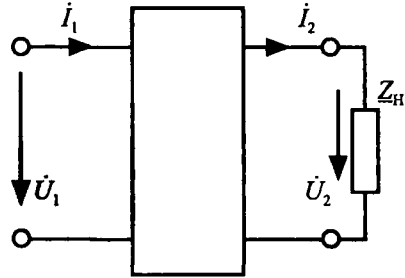


Рис. 4.26

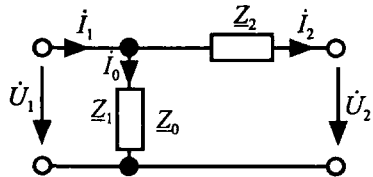
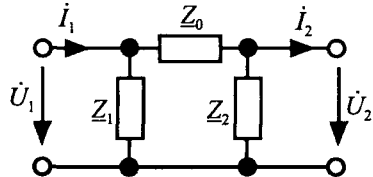
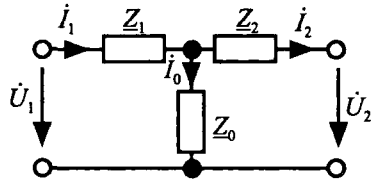


Рис. 4.27

Якщо врахувати залежність для струму \dot{I}_1 , то можна дістати

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0} \dot{U}_2 + \left(\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0} \right) \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_1 = \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0} \right) \dot{U}_2 + \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0} \right) \dot{I}_2.$$

Отже, вхідні і вихідні величини зв'язані *лінійно в основних рівняннях чотириполосника*:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A} \dot{U}_2 + \underline{B} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \underline{C} \dot{U}_2 + \underline{D} \dot{I}_2 \end{cases}$$

де \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} — коефіцієнти чотириполосника, що визначаються таким чином:

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0},$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0},$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_0},$$

$$\underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0}.$$

Завжди має слушність співвідношення коефіцієнтів:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1.$$

4.14.5. Коефіцієнти чотириполосника можна визначати експериментально за дослідом холостого (неробочого) ходу та короткого замикання.

У досліді холостого ходу $\dot{I}_2 = 0$, а $\dot{U}_2 = \dot{U}_{2x}$. У цьому випадку рівняння чотириполосника мають такий вигляд:

$$\dot{U}_1 = \underline{A} \dot{U}_{2x},$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C} \dot{U}_{2x}.$$

4. Кола синусоїдного струму

При короткому замиканні $\dot{U}_2 = 0$, а $\dot{I}_2 = \dot{I}_{2к}$, а рівняння –

$$\dot{U}_1 = \underline{B}\dot{I}_{2к},$$

$$\dot{I}_1 = \underline{D}\dot{I}_{2к}.$$

Коефіцієнти чотириполосника мають сенс:

$\underline{A} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{2х}}$ – величина, обернена коефіцієнту підсилення за напругою;

$\underline{D} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_{2к}}$ – величина, обернена коефіцієнту підсилення за струмом;

$\underline{B} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{2к}}$ – передаточний опір при замкнених вихідних затискачах;

$\underline{C} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_{2х}}$ – передаточна провідність при розімкнених вихідних затискачах.

5. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

5.1. Основні положення

5.1.1. Із метою заощадження електричної енергії під час її транспортування та ефективності її використання у техніці об'єднують низку кіл із незалежними джерелами живлення в одну систему. Широко використовуються трифазні та шестифазні кола.

Трифазну систему вперше розробив та впровадив наприкінці XIX ст. М. О. Доливо-Добровольський. Джерелом енергії у трифазних системах є три обмотки генератора. Обмотки укладаються таким чином, що вони індують змінні ЕРС, які зсунуті на третину періоду.

5.1.2. *Трифазне електричне коло – це сукупність трьох електричних кіл, що мають синусоїдну ЕРС однакової амплітуди і частоти. ЕРС зсунуті за фазою на одну третину періоду.* Ці ЕРС генеруються в одному (зазвичай машинному) джерелі живлення.

Фазами називають незалежні електричні кола з незалежними джерелами живлення, що об'єднуються в одну систему.

Фазами також називаються незалежні джерела живлення кожного кола, що об'єднуються.

Фазами ще називаються приймачі електричної енергії в кожному колі, що об'єднуються.

За визначенням трифазної системи миттєві значення фазних ЕРС є:

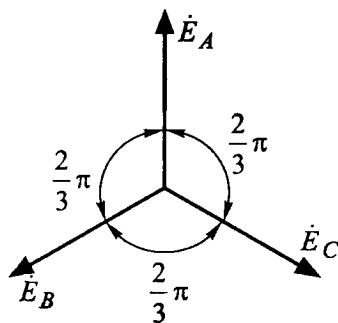


Рис. 5.1

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Фази джерел позначаються буквами A , B , C , а фази приймачів – a , b , c . На рис. 5.1 наведено векторну діаграму ЕРС.

Трифазна система, що має однакові умови в усіх фазах (комплексні опори та амплітуди ЕРС рівні), називається симетричною.

5.2. З'єднання зіркою

5.2.1. Три незалежних кола можна об'єднати таким чином, що кінці фазних обмоток генератора та фази приймачів утворять два вузли (рис. 5.2). Таке об'єднання називається *з'єднанням зіркою*.

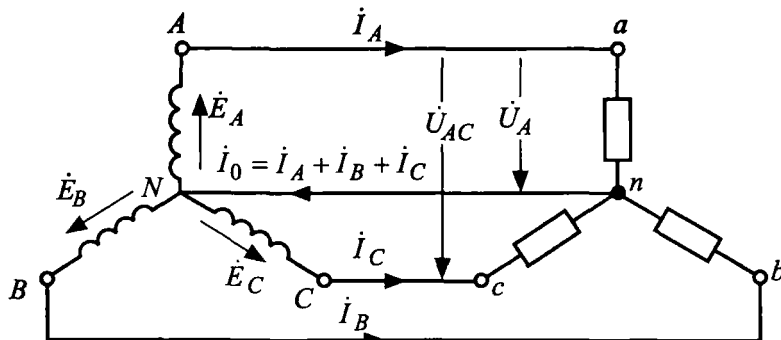


Рис. 5.2

5.2.2. Провід, що з'єднує два вузли, називається *нейтральним*, або *нейтраллю*. Інші проводи (*Aa*, *Bb*, *Cc*) називаються *лінійними*. Напряга на затискачах фаз генератора (або навантаження) називається *фазною напругою*. Струм у обмотках фаз або фазних навантаженнях – *фазний струм*. Напряга між лінійними проводами – *лінійна напруга*. Струм у лінійних проводах називається *лінійним струмом*.

5.2.3. Струм у нейтральному проводі

$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Якщо система симетрична, то

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t, \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ i_C &= I_m \sin(\omega t - 4\pi/3). \end{aligned}$$

У цьому разі

$$i_0 = I_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3)] = 0.$$

Отже, якщо навантаження симетричне, струм у нейтральному проводі відсутній.

5.2.4. Із схеми, наведеної на рис. 5.2, випливає:

$$\dot{I}_л = \dot{I}_\phi,$$

тобто при з'єднанні зіркою завжди лінійний струм є й фазним струмом. Лінійні напруги є різницею відповідних фазних напруг:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

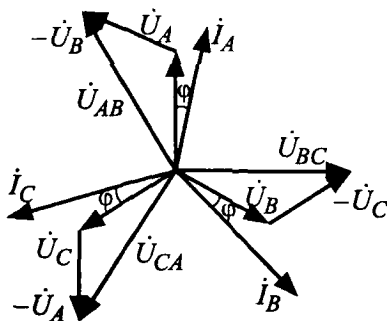


Рис. 5.3

Векторна діаграма трифазного кола при з'єднанні у зірку наведена на рис. 5.3.

Вектори фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ зсунуті на третину періоду відносно один одного.

Струми у фазах відстають на кут ϕ , лінійні напруги визначають

як геометричну різницю векторів ($\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ та ін.).

При симетричному навантаженні із трикутників напруг випливає:

$$U_л = \sqrt{3}U_\phi.$$

При з'єднанні зіркою використовують основні співвідношення:

$$\dot{I}_л = \dot{I}_\phi,$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A,$$

$$U_л = \sqrt{3}U_\phi \text{ (за умов симетрії).}$$

5.2.5. Застосовують трипровідну та чотирипровідну схеми з'єднання приймачів зіркою. Трифазні приймачі електричної енергії, що мають гарантоване симетричне навантаження, умикають за **трипровідною схемою** (тобто без нульового проводу). Типовим навантаженням такого типу є трифазні асинхронні двигуни, що мають симетричне навантаження фаз.

Звичайні однофазні приймачі електричної енергії (побутові прилади, лампи, електричні інструменти тощо) умикаються за чотирипровідною

5. Трифазні електричні кола

схемою (тобто з нульовим проводом). Нульовий провід забезпечує однакові фазні напруги на приймачах при несиметричному навантаженні. Крім того, можна застосовувати як лінійну, так і фазну напругу на приймачах.

5.2.6. Вмикання споживачів у трифазну систему виконують згідно зі схемою, наведеною на рис. 5.4.

У нейтральний провід запобіжник не ставлять, тому що при неповній симетрії може виникнути явище “перекіс фаз”. Це таке явище, коли в деяких фазах напруга буде підвищена, а у декотрих — знижена. Наявність нейтрального проводу дає змогу уникнути цього явища.

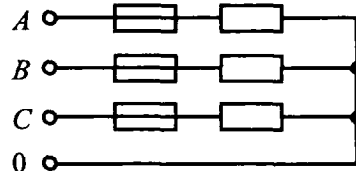


Рис. 5.4

5.3. З'єднання трикутником

5.3.1. Обмотки генератора та навантаження можна об'єднати так, як наведено на рис. 5.5. Це з'єднання називається з'єднанням *трикутником*. У цьому випадку коло буде трипровідним.

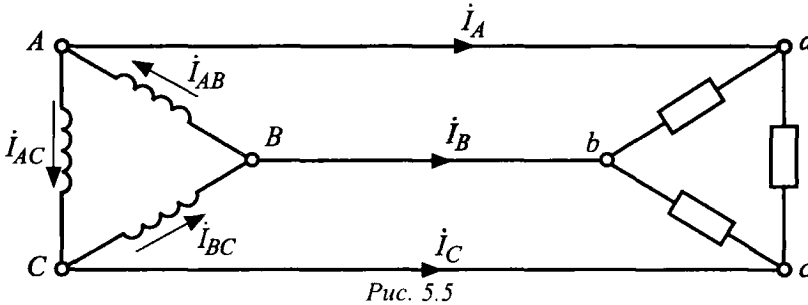


Рис. 5.5

5.3.2. Із схеми з'єднання трикутником випливає:

$$\dot{U}_л = \dot{U}_ф,$$

тобто при з'єднанні трикутником завжди лінійна напруга є і фазною напругою. За законом Кірхгофа, лінійні струми зв'язані із фазними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \dot{i}_A &= \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{AC}, \\ \dot{i}_B &= \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB}, \\ \dot{i}_C &= \dot{i}_{AC} - \dot{i}_{BC}. \end{aligned}$$

Векторну діаграму (рис. 5.6) зручно починати будувати з векторів лінійних (вони ж і фазні) напруг. Фазні струми відстають від них на кут φ за симетрією.

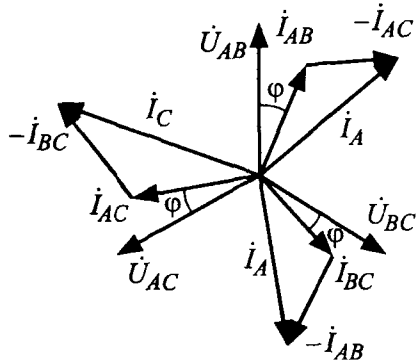


Рис. 5.6

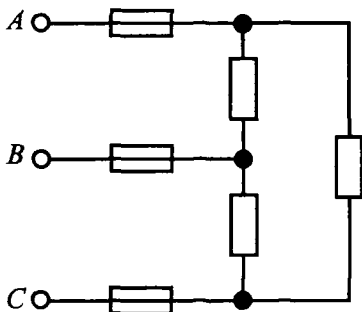


Рис. 5.7

У цьому разі з трикутників струмів можна дістати співвідношення:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$$

5.3.3. Таким чином, якщо коло має з'єднання трикутником, *основні розрахункові співвідношення мають такий вигляд:*

$$\dot{U}_{\text{л}} = \dot{U}_{\text{ф}}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{AC}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{AC} - \dot{I}_{BC}$$

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}} \text{ (за симетричним навантаженням).}$$

5.3.4. До трифазної системи при з'єднанні трикутником навантаження вмикається за схемою, наведеною на рис. 5.7. Перевагою цього з'єднання є відсутність четвертого проводу. Крім того, якщо навантаження з'єднане трикутником, то явище перекосу фаз не виникає.

5.4. Потужність трифазної системи

5.4.1. Потужність трифазного кола можна визначити як суму потужностей усіх фаз та потужності нейтрального проводу, тобто

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C + \underline{S}_N$$

Але потужністю, що виділяється у нейтральному проводі, можна знехтувати.

5. Трифазні електричні кола

Потужність кожної фази у символічному вигляді визначається добутком комплексу напруги на спряжений комплекс струму:

$$\underline{S} = \dot{U}_A I_A^* + \dot{U}_B I_B^* + \dot{U}_C I_C^*.$$

Доданки у цьому рівнянні визначають як звичайні комплекси фазної потужності, тобто:

$$\dot{U}_A I_A^* = S_A \cos \varphi_A + j S_A \sin \varphi_A,$$

$$\dot{U}_B I_B^* = S_B \cos \varphi_B + j S_B \sin \varphi_B,$$

$$\dot{U}_C I_C^* = S_C \cos \varphi_C + j S_C \sin \varphi_C.$$

Дійсна частина комплексу фазної потужності називається *активною потужністю фази*, а уявна — *реактивною*:

$$P_A = S_A \cos \varphi_A,$$

$$P_B = S_B \cos \varphi_B,$$

$$P_C = S_C \cos \varphi_C,$$

$$Q_A = S_A \sin \varphi_A,$$

$$Q_B = S_B \sin \varphi_B,$$

$$Q_C = S_C \sin \varphi_C.$$

Отже, потужність трифазної системи

$$\underline{S} = (P_A + P_B + P_C) + j(Q_A + Q_B + Q_C).$$

Дійсна частина комплексу потужності трифазного кола

$$P = P_A + P_B + P_C$$

називається *активною потужністю кола*, а уявна —

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C$$

називається *реактивною*.

Потужність трифазного кола у символічному вигляді має вирази:

$$\underline{S} = P + jQ,$$

$$\underline{S} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi,$$

$$\underline{S} = S e^{j\varphi}.$$

При цьому завжди

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}.$$

5.4.2. Активною потужністю називають суму активних потужностей усіх фаз та потужності, що виділяється у колі нейтрального проводу, тобто

$$P = P_A + P_B + P_C + P_N.$$

Часто потужністю P_N нехтують та вважають, що

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Таким же чином визначають і реактивну потужність:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C.$$

За симетричною системою

$$P = 3P_\phi,$$

$$Q = 3Q_\phi,$$

якщо фазні потужності

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

$$Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi,$$

то

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi,$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi.$$

Повна потужність:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

$$S = 3U_\phi I_\phi.$$

5.4.3. Вирази потужності можна записати також за допомогою лінійних величин.

Щодо з'єднання зіркою:

$$I_{л} = I_\phi, \quad U_{л} = \sqrt{3}U_\phi,$$

5. Трифазні електричні кола

а також

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi,$$

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi,$$

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}.$$

Щодо з'єднання трикутником:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}, \quad I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}},$$

а також

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi,$$

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi,$$

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}.$$

Таким чином, співвідношення для потужності (активної, реактивної чи повної) не залежать від виду з'єднання. Але із цих формул не можна робити висновок, що потужність не змінюється зі зміною способу з'єднання навантаження тому, що при цьому змінюються лінійні та фазні величини.

5.5. Перемикання навантаження із зірки на трикутник та навпаки

5.5.1. Зміною вигляду з'єднання приймачів можна зменшити пусковий струм електричного двигуна, підвищити потужність, що виділяється у навантаженні, а також змінити інші величини трифазного кола. Перемикання приймачів із зірки на трикутник та навпаки робиться за допомогою найпростішого перемикача, наведеного на рис. 5.8.

5.5.2. При такому перемиканні залишаються постійними лінійні напруги, та не змінюються фазні навантаження, тобто

$$U_{\text{л}} = \text{const}, \quad Z_{\text{ф}} = \text{const}.$$

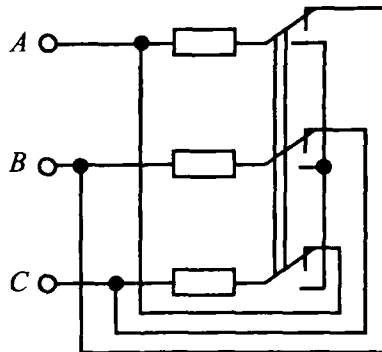


Рис. 5.8

Треба визначити, як зміняться лінійні, фазні струми та потужність при перемиканні навантаження з трикутника Δ на зірку Y . Тобто:

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = ?, \quad \frac{I_{\phi\Delta}}{I_{\phi Y}} = ?, \quad \frac{P_{\Delta}}{P_Y} = ?$$

Щодо з'єднання зіркою:

$$I_{лY} = I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi Y}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_{\phi}},$$

$$P_Y = \sqrt{3}U_{л}I_{лY} \cos \varphi = \frac{U_{л}^2}{Z_{\phi}} \cos \varphi.$$

Щодо з'єднання трикутником:

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{л}}{Z_{\phi}},$$

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_{л}}{Z_{\phi}},$$

$$P_{\Delta} = \sqrt{3}U_{л}I_{л\Delta} \cos \varphi = 3 \frac{U_{л}^2}{Z_{\phi}} \cos \varphi.$$

Таким чином,

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = 3, \quad \frac{I_{\phi\Delta}}{I_{\phi Y}} = \sqrt{3}, \quad \frac{P_{\Delta}}{P_Y} = 3.$$

5.5.3. Отже, при перемиканні навантаження з зірки на трикутник лінійний струм підвищується у три рази, фазний струм — у $\sqrt{3}$, активна та реактивна потужності підвищуються у три рази.

5.6. Розрахунок симетричних трифазних систем

5.6.1. При обчисленні симетричних трифазних систем перш за все треба використовувати еквівалентні перетворення, тобто:

$$Z_Y = \frac{Z_{\Delta}}{3}.$$

5. Трифазні електричні кола

5.6.2. Якщо навантаження з'єднане зіркою, розрахунок здійснюється за однією фазою (рис. 5.9). Задаються фазні навантаження та лінійні напруги. Треба визначити струм та фазні напруги:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}Z_{\phi}},$$

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}Z_{\phi}}.$$

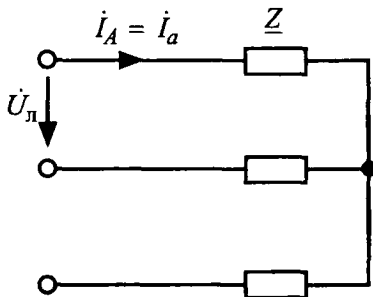


Рис. 5.9

Якщо навантаження з'єднане трикутником (рис. 5.10), обчислення також виконується за однією фазою. Задаються лінійні напруги та фазне навантаження.

Треба визначити фазну напругу та струми, тобто:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\text{л}}}{Z_{\phi}},$$

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi} = \sqrt{3} \frac{U_{\text{л}}}{Z_{\phi}}.$$

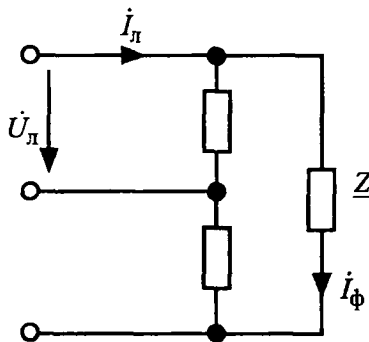


Рис. 5.10

5.7. Розрахунок несиметричних систем

5.7.1. При з'єднанні зіркою зазвичай задані фазні напруги, фазні навантаження та опір нейтрального проводу (рис. 5.11), тобто:

$$\begin{aligned} & \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \\ & \underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c, \underline{Z}_n. \end{aligned}$$

Треба визначити фазні напруги на навантаженнях, напругу між нейтралями,

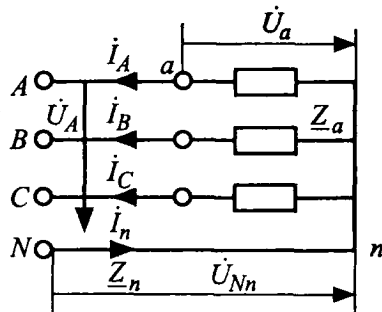


Рис. 5.11

лінійні струми та струм у нейтральному проводі, тобто:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c, \dot{U}_{Nn}, \\ \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{I}_n. \end{aligned}$$

Напругу між нейтралями можна визначити за методом вузлової напруги:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_B + \underline{Y}_c \dot{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_n},$$

де $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$, $\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b$, $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$, $\underline{Y}_n = 1/\underline{Z}_n$ – комплекси провідностей відповідних фаз та нейтралі.

Фазні напруги на прийमाках можна визначити у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}. \end{aligned}$$

Лінійні (вони ж і фазні) струми та струм у нейтральному проводі визначають так:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \underline{Y}_a \dot{U}_a; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \underline{Y}_b \dot{U}_b; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \underline{Y}_c \dot{U}_c; \\ \dot{I}_n &= \frac{\dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_n} = \underline{Y}_n \dot{U}_{Nn}. \end{aligned}$$

Щоб перевірити, можна порівняти:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

5.7.2. Векторну діаграму несиметричної зірки будують так, як показано на рис. 5.3. Але можна побудувати діаграму тільки для напруг у інший спосіб. Взагалі векторні діаграми можна будувати по-різному.

5. Трифазні електричні кола

Це не принципово, треба тільки дотримуватись основних співвідношень та правил векторного аналізу. Вектори фазних напруг генератора ($\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$) зсунуті на кут 120° . Точка N відповідає потенціалу нейтральної точки генератора, зручно потенціал точки N дорівняти нулеві (рис. 5.12). Лінійні напруги визначаються і будуються відповідно правилам векторного аналізу:

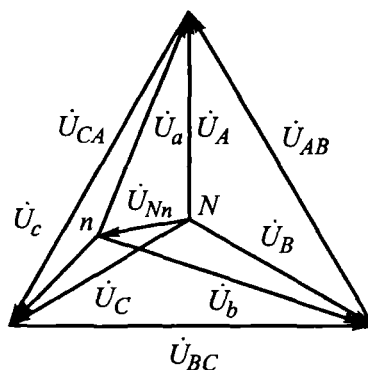


Рис. 5.12

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned}$$

Визначена за методом вузлової напруги \dot{U}_{Nn} відповідає вектору, а точка n характеризує потенціал нейтральної точки приймача. У такій спосіб можна побудувати вектори фазних напруг приймача:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}. \end{aligned}$$

Якщо опір нейтрального провода дорівнює нулеві, то точки N та n збігаються.

5.7.3. Щодо з'єднання трикутником (рис. 5.13), то зазвичай задані лінійні (вони ж і фазні) напруги та фазні навантаження:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ac}; \\ \underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ac}. \end{aligned}$$

Треба визначити лінійні та фазні струми

$$\begin{aligned} \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \\ \dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ac}. \end{aligned}$$

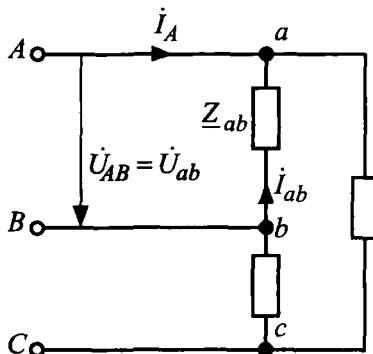


Рис. 5.13

Фазні струми визначаються за допомогою фазних напруг, тобто:

$$\dot{I}_{ac} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}},$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}},$$

$$\dot{I}_{ac} = \frac{\dot{U}_{ac}}{\underline{Z}_{ac}}.$$

Лінійні струми обчислюють за допомогою основних співвідношень струмів щодо з'єднання трикутником:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ac},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ac} - \dot{I}_{bc}.$$

Незалежно від характеру навантаження, завжди

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Якщо навантаження несиметричне (змінюється, наприклад, опір однієї фази), режим роботи інших двох фаз не змінюється. Змінюється лише струм цієї фази та лінійні струми у провадах, що з'єднані з цією фазою. Тому схему з'єднання трикутником дуже зручно використовувати при несиметричному навантаженні. Явище “перекосу фаз” принципово не може виникати.

5.7.4. Інколи векторну діаграму несиметричного трикутника будують не так, як наведено на рис. 5.6. Згідно з правилами векторного аналізу будують вектори лінійних напруг, що зсунуті під кутом 120° не з однієї точки, а у вигляді трикутника. Фазні струми відстають від них на фазні кути зсуву. За співвідношеннями:

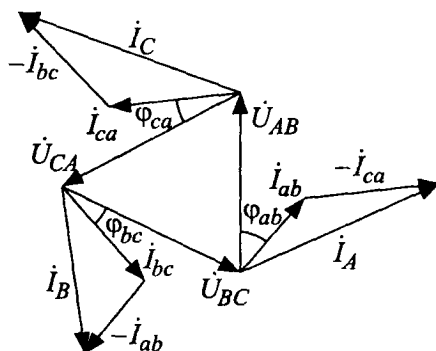


Рис. 5.14

аналізу будують вектори лінійних напруг, що зсунуті під кутом 120° не з однієї точки, а у вигляді трикутника. Фазні струми відстають від них на фазні кути зсуву. За співвідношеннями:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

геометрично визначаються вектори лінійних струмів (рис. 5.14).

6. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

6.1. Основні положення

6.1.1. **Перехідними** називають процеси, що проходять при змінах режиму роботи в електричних колах. Ці процеси проходять в електричних колах при вмиканні на напругу, вимиканні джерела живлення, зміні параметрів елементів, що вміщує коло. У електротехніці перехідні процеси мають велике значення.

6.1.2. Для розгляду особливостей перехідних процесів використовують два закони комутації. За допомогою законів комутації виявляють початкові умови перехідних процесів.

6.1.3. *Перший закон комутації* формулюється так: сила струму у колі з індуктивністю не може змінитися стрибком. Якщо припустити стрибкову зміну сили струму, то це вимагатиме нескінченної величини ЕРС самоіндукції, оскільки:

$$e_L = -\frac{d}{dt}(Li).$$

За *другим законом комутації*, напруга на обкладках конденсатора та заряд ємності не можуть змінюватися стрибком. В іншому разі струм у колі буде нескінченно великим:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt},$$

де q — заряд ємності,

u_c — напруга на обкладках конденсатора.

6.2. Перехідні процеси у колах постійного струму з індуктивністю

Розглянемо вмикання індуктивності на постійну напругу (рис. 6.1). За другим законом Кірхгофа,

$$U = iR + \frac{d}{dt}(Li)$$

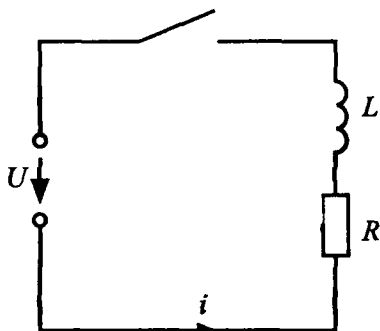


Рис. 6.1

Якщо $L = \text{const}$, то можна розділити змінні у цьому рівнянні та розв'язати його відносно струму, тобто:

$$U - iR = L \frac{di}{dt};$$

$$\frac{U}{R} - i = \frac{L}{R} \frac{di}{dt}.$$

Звичайно $U/R = I$ називають усталеним струмом, тобто таку силу має струм після закінчення перехідного явища.

Це струм, що встановлюється у колі, коли перехідних явищ немає. Змінні розділяються:

$$(I - i)dt = \frac{L}{R} di;$$

$$\frac{R}{L} dt = \frac{di}{I - i}.$$

Можна проінтегрувати ліву та праву частини рівняння:

$$\frac{R}{L} t = -\ln \frac{I - i}{A},$$

де A — стала інтегрування, що визначається за початковими умовами.

Після потенціювання можна дістати:

$$e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{I - i}{A}.$$

Щоб визначити початкові умови, треба використати перший закон комутації. При $t = 0$ $i = 0$ тому, що струм не може змінюватися стрибком (до вмикання кола $i = 0$, тобто при $t = 0$, $i = 0$). За допомогою підстановки початкових умов у останній вираз визначаємо $A = I$.

Таким чином, струм у колі змінюється за експонентою:

$$i = I \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

6. Перехідні процеси

Величина $\tau = L/R$ має розмірність часу, називається сталою часу та характеризує швидкість процесу (рис. 6.2). Вважають, що при $t = (3...5)\tau$ перехідний процес практично закінчується.

Припустимо, що індуктивність з усталеним струмом миттєво вимикають від джерела та вмикають на резисторне навантаження. Рівняння кола (за другим законом Кірхгофа) має вигляд:

$$0 = iR + L \frac{di}{dt}$$

Проінтегрувавши це рівняння розподілом змінних, маємо:

$$\begin{aligned} -\frac{R}{L} dt &= \frac{di}{i}, & -\frac{R}{L} t &= \ln \frac{i}{A}; \\ e^{-\frac{R}{L} t} &= \frac{i}{A}, & i &= Ae^{-\frac{R}{L} t}, \end{aligned}$$

де A — стала інтегрування, що визначається за початковими умовами: $t = 0, i = I$ (за першим законом комутації), тобто $A = I$.

Таким чином, струм у колі змінюється за експонентою (рис. 6.3):

$$i = Ie^{-\frac{R}{L} t}$$

6.2.1. Стала часу у колах з індуктивністю залежить тільки від співвідношення індуктивності та активного опору. Термін процесу не залежить від електричних величин.

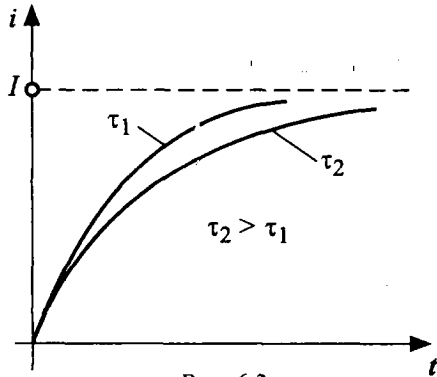


Рис. 6.2

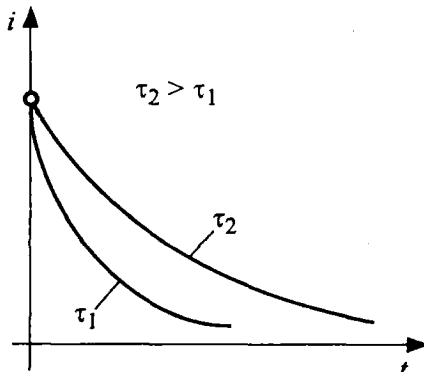


Рис. 6.3

6.3. Перехідні процеси у колах постійного струму з ємністю

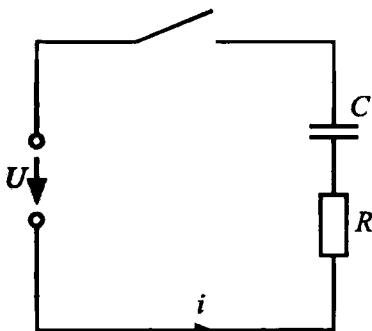


Рис. 6.4

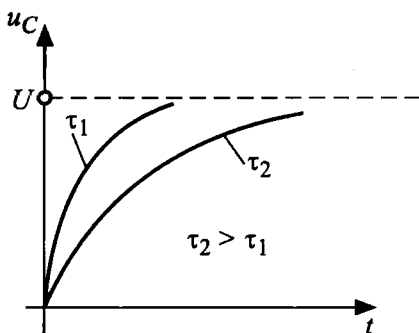


Рис. 6.5

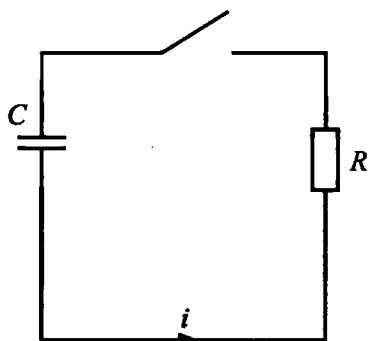


Рис. 6.6

6.3.1. На рис. 6.4 наведено коло заряду конденсатора. Визначимо залежність зміни напруги на обкладках конденсатора від часу. Рівняння кола має вигляд:

$$U = iR + u_C.$$

Якщо

$$i = C \frac{du_C}{dt},$$

то

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

Це диференціальне рівняння розв'язується розділенням змінних:

$$\frac{dt}{RC} = \frac{du_C}{U - u_C};$$

$$-\frac{t}{RC} = \ln \frac{U - u_C}{A},$$

де A — стала інтегрування, що визначається за початковими умовами. За другим законом комутації, $t = 0$, $u_C = 0$, $A = U$. Напруга на обкладках конденсатора змінюється за законом:

$$u_C = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

Ця залежність зображена на рис. 6.5. Стала часу $\tau = RC$ характеризує швидкість процесу.

Розрядку конденсатора можна розглядати за схемою, що наведена на рис. 6.6. Рівняння кола у цьому разі має вигляд:

$$0 = u_C + iR.$$

6. Перехідні процеси

Якщо поділити змінні та проінтегрувати, можна визначити закон зміни напруги на обкладках конденсатора:

$$u_c = Ae^{-\frac{t}{RC}},$$

де A — стала інтегрування ($A = U$).

Таким чином,

$$u_c = Ue^{-\frac{t}{RC}}.$$

Стала часу $\tau = RC$ визначає швидкість перебігу процесу (рис. 6.7). Вважають, що перехідний процес закінчується у термін, який дорівнює $(3 \dots 5)\tau$.

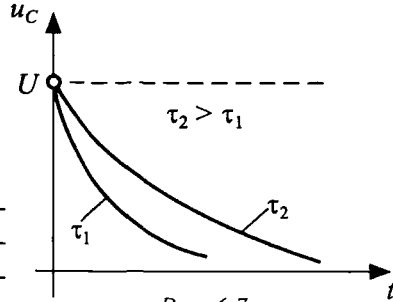


Рис. 6.7

6.4. Примусові та вільні складові перехідних струмів і напруг

6.4.1. Рівняння кола, що має R , L та C ,

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + u_c,$$

де u — напруга на клеммах джерела живлення (у загальному випадку може залежати від часу).

$$u_c = \frac{1}{C} \int idt,$$

тобто рівняння кола перетворюється на таке:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt.$$

Це рівняння типу

$$\frac{d^2i}{dt^2} + A \frac{di}{dt} + Bi = C(t),$$

тобто це лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку.

6.4.2. Перехідні процеси у колі, що має усі параметри, у загальному разі описуються лінійним рівнянням другого порядку з правою частиною. Права частина визначає ЕРС джерела живлення.

Загальний інтеграл такого рівняння є сума загального розв'язку (рівняння без правої частини) та окремого розв'язку (рівняння з правою частиною), тобто:

$$i = i' + i'',$$

де i' — окремий розв'язок,

i'' — загальний розв'язок.

6.4.3. Окремий розв'язок (i') характеризує перебіг процесу під дією ЕРС визнаної форми (права частина рівняння). Тому окремий розв'язок називається *примусовою складовою струму, або примусовим струмом*. Загальний розв'язок (i'') характеризує перебіг процесу без ЕРС. Тому загальний розв'язок називається *вільною складовою струму, або вільним струмом*. Таким чином, примусовий процес — це процес після закінчення перехідних явищ, який проходить під впливом ЕРС.

6.5. Перехідні процеси у колах синусоїдного струму з індуктивністю

6.5.1. Якщо індуктивність та активний опір увімкнуті на синусоїдну ЕРС, то за другим законом Кірхгофа:

$$u = iR + L \frac{di}{dt};$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha);$$

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = iR + L \frac{di}{dt},$$

де α — початкова фаза напруги.

6.5.2. *Примусовий струм* (струм під впливом синусоїдної ЕРС) завжди є синусоїдним і відстає від напруги на зсув фаз φ , тобто:

$$i' = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi).$$

6.5.3. Вільну складову струму можна визначити, розв'язуючи рівняння без правої частини, тобто:

$$\begin{aligned} \frac{di''}{dt} &= -\frac{i''R}{L}; \\ \frac{di''}{i''} &= -\frac{R}{L} dt; \\ i'' &= Ae^{-\frac{R}{L}t}, \end{aligned}$$

де A — стала інтегрування, що визначається за початковими умовами. При $t = 0$, $i = 0$, але $i = i' + i''$, тобто $i' = -i''$, $A = -i'(0)$,

$$\begin{aligned} A &= -I_m \sin(\alpha - \varphi), \\ i'' &= -I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}. \end{aligned}$$

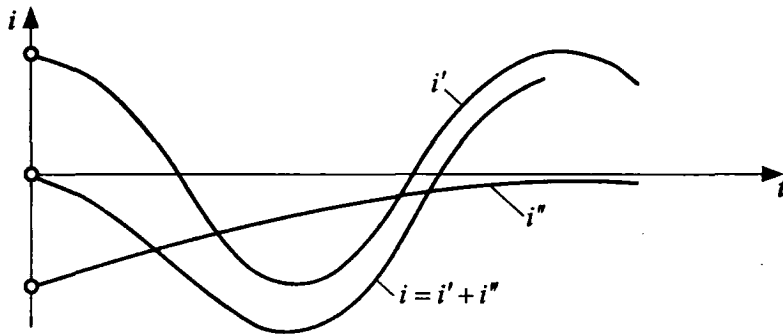


Рис. 6.8

6.5.4. Перехідний струм у колі ($i = i' + i''$) змінюється за законом:

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Примусова складова є синусоїда, вільна складова струму — експонента (рис. 6.8). Перехідний струм може мати амплітуду майже удвічі більшу, ніж амплітуда примусової складової.

6.6. Перехідні процеси у колах синусоїдного струму з ємністю

6.6.1. Якщо увімкнути ємність та активний опір на синусоїдну ЕРС, то рівняння кола:

$$\begin{aligned}U_m \sin(\omega t + \alpha) &= iR + u_C; \\i &= C \frac{du_C}{dt}; \\U_m \sin(\omega t + \alpha) &= RC \frac{du_C}{dt} + u_C.\end{aligned}$$

6.6.2. Струм у колі з ємністю, увімкнутою на синусоїдну ЕРС, завжди лишається синусоїдним і випереджає напругу на зсув фаз φ . Це **примусовий** струм, тобто:

$$i' = \frac{U_{Cm}}{Z} \sin(\omega t + \alpha + \varphi),$$

де φ — зсув фаз між струмом та напругою.

Оскільки напруга на обкладках конденсатора відстає від струму на $\pi/2$, примусову напругу можна визначити таким чином:

$$u'_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \alpha + \varphi - \pi/2).$$

6.6.3. Вільну складову напруги визначають із розв'язування рівняння без правої частини:

$$\begin{aligned}\frac{du''_C}{dt} &= -\frac{u''_C}{RC}; \\u''_C &= A e^{-\frac{t}{RC}},\end{aligned}$$

де A визначається за початковими умовами. При $t = 0$, $u_C = u'_C + u''_C$
 $u''_C(0) = -u'_C(0)$, $A = -u'_C(0)$:

$$\begin{aligned}A &= -U_{Cm} \sin(\alpha + \varphi - \pi/2); \\u''_C &= -U_{Cm} \sin(\alpha + \varphi - \pi/2) e^{-\frac{t}{RC}}.\end{aligned}$$

6. Перехідні процеси

6.6.4. Перехідна напруга на обкладках конденсатора ($u_C = u'_C + u''_C$) змінюється за законом:

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \alpha + \varphi - \pi/2) - U_{Cm} \sin(\alpha + \varphi - \pi/2) e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Завдяки перехідному процесу конденсатор можна зарядити майже до подвійної амплітуди усталеної напруги (рис. 6.9).

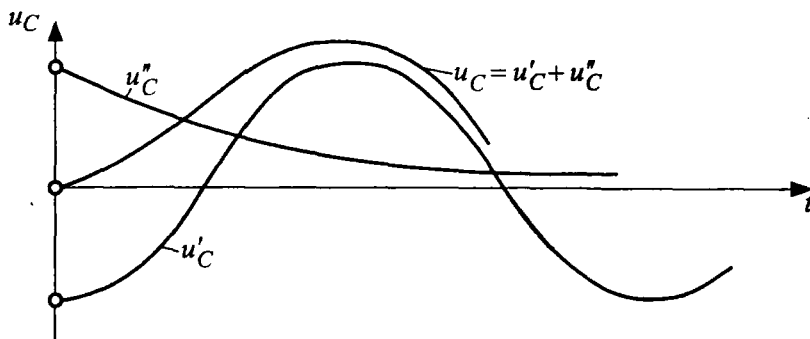


Рис. 6.9

7. МАГНІТНІ КОЛА З ПОСТІЙНОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ

7.1. Основні поняття

7.1.1. Навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле. Це поле впливає на магнітну стрілку, два провідники взаємодіють один з одним. Силова дія магнітного поля має й інші прояви. За класичною теорією електромагнетизму, джерелами магнітного поля є електричні макро- та мікроструми.

Фарадеєм був запроваджений термін “магнітне поле”. Згодом класичну теорію магнітного поля побудував Максвелл, а у XX сторіччі з’явилась квантова теорія магнітного поля.

7.1.2. Величина та напрям магнітного поля характеризуються його напруженістю \vec{H} . Магнітне поле змінює стан середовища. Стан середовища, що змінився під впливом магнітного поля, характеризується магнітною індукцією \vec{B} .

Магнітна індукція та напруженість зв’язані співвідношеннями:

$$\frac{B}{H} = \mu_a; \quad \mu = \mu_a / \mu_0,$$

де μ_a — абсолютна магнітна проникність;

μ — відносна магнітна проникність;

μ_0 — магнітна стала.

7.1.3. За магнітними властивостями середовище буває:

феромагнітним ($\mu \gg 1$);

парамагнітним ($\mu \geq 1$);

діамагнітним ($\mu < 1$).

Магнітний потік визначається співвідношенням:

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{S}.$$

7.2. Закони електромагнетизму

7.2.1. Електричний струм збуджує магнітне поле. Ця здатність струму характеризується *магніторушійною силою (МРС)*. Ця сила

7. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

називається ще намагнічуючою, або повним струмом. Магніторушійна сила чисельно дорівнює силі струму.

Дослідним шляхом одержано закон повного струму — циркуляція вектора напруженості за замкнутим контуром дорівнює повному струмові, що зчеплений із цим контуром:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I = F.$$

Додатними вважають струми, напрям магнітного поля яких збігається з напрямом обходу контуру. Напрямок магнітного поля визначається за правилом буравчика. Щодо прикладу на рис. 7.1, закон повного струму має вигляд:

$$\oint H dl = I_1 - I_2 - I_3 + I_4.$$

7.2.2. Котушка індуктивності, що вмикається на джерело постійного струму, має МРС:

$$F = wI,$$

де w — число витків;

I — сила струму у котушці.

7.2.3. За допомогою закону повного струму можна розв'язати багато академічних задач. Наприклад, визначимо напруженість магнітного поля на довільній відстані X від провідника зі струмом I (рис. 7.2). Замкненим контуром можна обрати коло, що має радіус X . Тоді, за законом повного струму:

$$\begin{aligned} \oint H dl &= I; \\ H 2\pi X &= I; \\ H &= \frac{I}{2\pi X}. \end{aligned}$$

Зазвичай усе магнітне коло поділяють на однорідні ділянки. Ділянка є однорідною, якщо вона має сталі напруженість та

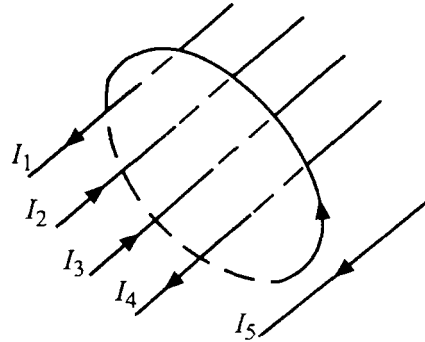


Рис. 7.1

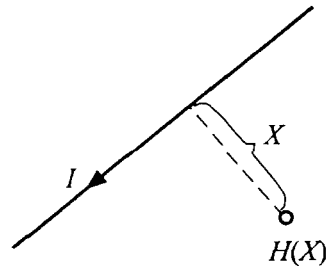


Рис. 7.2

переріз осердя. У цьому разі закон повного струму матиме такий вигляд:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = wI.$$

Якщо використати співвідношення

$$H_k = \frac{B_k}{\mu_{ak}}, \quad \Phi = B_k S_k,$$

то впливає закон Ома щодо магнітного кола:

$$\Phi = \frac{wI}{\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k}},$$

де l_k — довжина ділянки;

μ_{ak} — абсолютна магнітна проникність на ділянці кола;

S_k — переріз ділянки;

$$\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k} = R_M \quad \text{— магнітний опір магнітного кола.}$$

7.2.4. На провідник із струмом, що знаходиться у магнітному полі, діє сила. Ця сила пропорційна струму, магнітній індукції та активній довжині провідника, тобто:

$$F = BIl \sin \alpha,$$

де α — кут між B та I . Напрямок дії сили визначається за правилом лівої руки. Цей закон називається *законом електромагнітної сили*.

7.2.5. За *законом електромагнітної індукції* у провідникові, що рухається у магнітному полі, індукується ЕРС, тобто:

$$E = -vBl \sin \alpha,$$

де E — ЕРС провідника;

v — швидкість його руху.

Напрямок струму визначається за правилом правих рук. У загальному разі ЕРС дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, зчепленого з контуром, у якому вона індукується, тобто:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

Знак “-” підтверджує правило Ленца. Тобто ЕРС прагне протидіяти причині, що її зумовлює.

7.2.6. *Алгебраїчна сума магнітних потоків будь-якого вузла магнітного кола дорівнює нулеві:*

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0.$$

Це перший закон Кірхгофа для магнітного кола.

Другий закон Кірхгофа для магнітного кола — це закон повного струму:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m w_k I_k.$$

Добуток $H_k l_k$ називається магнітною напругою U_{mk} , тобто:

$$\sum_{k=1}^n w_k I_k = \sum_{k=1}^m U_{mk}.$$

Алгебраїчна сума МРС, що діють у замкненому контурі, дорівнює алгебраїчній сумі магнітних напруг на магнітних опорах цього контуру.

7.2.7. Напруженість магнітного поля вимірюється в амперах на метр (А/м), магнітний потік — у веберах ($\text{Вб} = \text{В} \cdot \text{с}$).

Магнітна індукція вимірюється у теслах ($\text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Вб}/\text{м}^2$).

Одиницею індуктивності є генрі ($\text{Гн} = \text{В} \cdot \text{с}/\text{А} = \text{Вб}/\text{А}$).

Магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн}/\text{м}$.

7.3. Феромагнетики

7.3.1. У феромагнітних матеріалах магнітна проникність велика та не стала. Ці матеріали намагнічуються в магнітному полі, тобто після закінчення дії магнітного поля вони зберігають магнітні властивості. Ці матеріали називаються **феромагнетиками**.

Магнітна проникність феромагнетиків не є сталою, тому використовується *крива намагнічування* (рис. 7.3). Кривою намагнічування

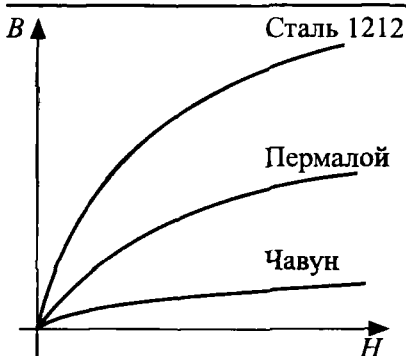


Рис. 7.3

називається залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля. Типова крива намагнічування має лінійну ділянку та ділянку насичення. Лінійну ділянку використовують при роботі феромагнетика у вимірювальних приладах, коли треба зберегти лінійну залежність магнітних властивостей матеріалу від напруженості магнітного поля.

Ділянку насичення використовують у таких приладах, де феромагнетик має забезпечити постійну та максимальну магнітну індукцію (генератори постійного струму, двигуни тощо).

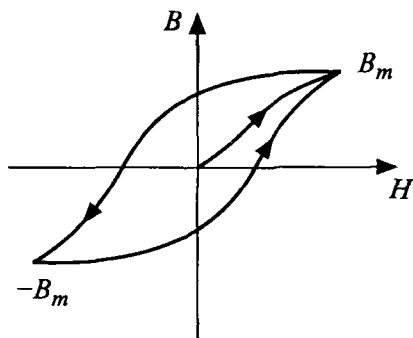


Рис. 7.4

7.3.2. Якщо розглянути процес змінного намагнічування феромагнетика, то можна побудувати *петлю гістерезису* (рис. 7.4). Форма та площа петлі залежить від матеріалу осердя. За петлею гістерезису визначаються характеристики феромагнітного матеріалу. Петля гістерезису визначається основними величинами (рис.7.5):

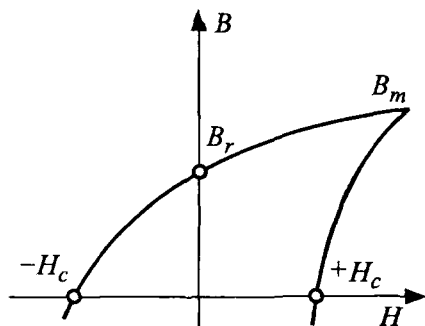


Рис. 7.5

а) *індукцією насичення* (B_m), максимальною індукцією, котру може забезпечити феромагнетик;
 б) *залишковою індукцією* (B_r), котра встановлюється у феромагнетика при вимкненні поля;

в) *коерцитивною силою* (H_c), тобто значенням напруженості поля, необхідного для розмагнічування феромагнетика (для встановлення індукції $B = 0$).

7. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, що витрачається на перемагнічування матеріалу. Коерцитивна сила характеризує спроможність матеріалу зберігати залишкову намагніченість. За значенням коерцитивної сили феромагнетики поділяються на:

- *магнітом'які* ($H_c < 0,01$ А/м), з вузькою петлею гістерезису (рис. 7.6, а);
- *магніотверді* ($H_c > 20$ кА/м), з широкою петлею гістерезису (рис. 7.6, б).

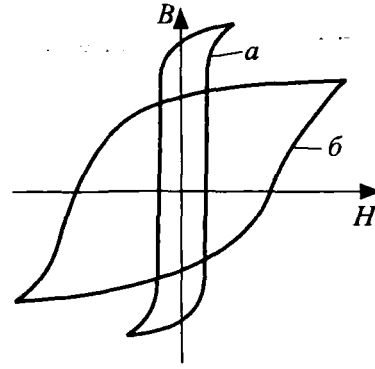


Рис. 7.6

7.3.3. Магнітом'які феромагнетики мають незначні втрати на перемагнічування матеріалу. Тому вони використовуються для створення змінних магнітних потоків, тобто у магнітних колах із котушками, увімкненими на змінну напругу. Магнітом'які осердя застосовуються у трансформаторах, двигунах та генераторах змінного струму, електромагнітах тощо.

В електротехнічних приладах застосовують холоднокатану електротехнічну сталь (марки 3412...3416), гарячекатану електротехнічну сталь (марки 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514) тощо.

Втрати на вихрові струми в осерді залежать від питомого електричного опору матеріалу. Застосування *феритів* в електротехнічних приладах та пристроях дає змогу зробити осердя суцільними, а не шихтованими. Ферити мають великий питомий електричний опір, їх застосовують у колах підвищеної частоти.

7.3.4. Магніотверді феромагнетики використовують для створення постійних магнітних потоків. Сталі магніти виготовляють із магніотвердих матеріалів.

Найпоширенішими є сплави типу ЮНДК (залізо, кобальт, нікель, алюміній) із великою коерцитивною силою.

Магнітні характеристики феромагнетиків погіршуються від механічних ударів і підвищення температури. Сталі магніти при цьому розмагнічуються.

7.4. Енергія магнітного поля

7.4.1. Якщо виток котушки знаходиться у змінному магнітному полі, то, за законом електромагнітної індукції, в ньому індукується ЕРС:

$$e_B = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Витки котушки з'єднані послідовно, тобто ЕРС котушки:

$$e_k = -\frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w).$$

Величина $\sum_{k=1}^w \Phi_k = \Psi$ називається потокозчепленням. Таким чином, ЕРС котушки:

$$e_k = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

7.4.2. Якщо усі витки проймаються однаковим потоком, то у цьому разі має місце повне потокозчеплення, тобто:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_w = \Phi;$$

$$\Psi = w\Phi;$$

$$e_k = -\frac{d\Psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt}.$$

Котушка індуктивності накопичує магнітну енергію:

$$W_M = \frac{Li^2}{2},$$

але $e_k = -\frac{d}{dt}(Li) = -\frac{d\Psi}{dt},$

тобто $\Psi = Li, \quad W_M = \frac{\Psi i}{2} = \frac{w\Phi i}{2}.$

За законом повного струму

$$wI = Hl_{oc},$$

де l_{oc} — середня довжина осердя. Магнітний потік $\Phi = BS$, тобто:

$$W_M = \frac{BH}{2} l_{oc} S.$$

7. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

Можна обчислити магнітну енергію в одиниці об'єму осердя:

$$\frac{W_M}{V} = \frac{BH}{2}$$

Враховуючи, що $V = l_{\text{oc}} S$ та $B/H = \mu_a$, можна визначити питому енергію:

$$\frac{W_M}{V} = \frac{B^2}{2\mu_a}$$

7.5. Взаємна індуктивність

7.5.1. Якщо першою котушкою пропустити струм, то магнітний потік Φ_{12} буде в ній індукватися та проймати другу котушку (рис. 7.7). Потокозчеплення другої котушки

$$\Psi_{12} = w_2 \Phi_{12}$$

Потокозчеплення Ψ_{12} пропорційне до струму у першій котушці. Коефіцієнт пропорційності називається взаємною індуктивністю і впливає з формули:

$$\Psi_{12} = M_{12} i_1,$$

тобто

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_1}.$$

Можна пропустити струм у другій котушці, тобто:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_2}.$$

За законом Ома щодо магнітного кола:

$$\Phi_{12} = \frac{w_1 i_1}{R_M}, \quad \Phi_{21} = \frac{w_2 i_2}{R_M}.$$

У цьому разі

$$\Psi_{12} = w_2 \Phi_{12} = w_1 w_2 \frac{i_1}{R_M};$$

$$M_{12} = M_{21} = M = \frac{w_1 w_2}{R_M}.$$

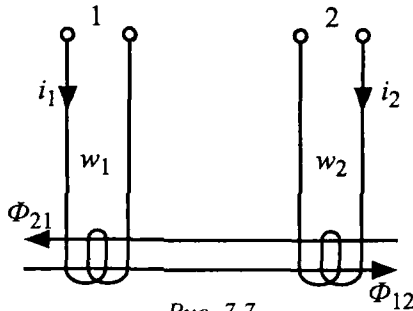


Рис. 7.7

7.5.2. ЕРС самоіндукції у котушках, що індукуються потоками Φ_{12} та Φ_{21} , буде:

$$e_2 = -\frac{d\psi_{12}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt};$$

$$e_1 = -\frac{d\psi_{21}}{dt} = -M \frac{di_2}{dt}.$$

7.5.3. Повне потокозчеплення кожної котушки складається із двох складових. Сума або різниця цих складових залежить від напрямку струмів у котушках та їх взаємного розташування. **Узгодженим** називається таке вмикання котушок, коли потокозначення додаються. При **зустрічному** вмиканні потокозначення віднімаються. На схемах умовно однойменні виводи котушок позначаються крапками. Отже, якщо струми у котушках спрямовані однаково щодо однойменних виводів, то вони увімкнуті узгоджено.

7.5.4. Величина $X_M = \omega M$ називається **опором взаємної індуктивності**. Комплексне зображення ЕРС взаємоіндукції у котушках має відповідно вигляд:

$$\dot{E}_2 = -jX_M \dot{I}_1;$$

$$\dot{E}_1 = -jX_M \dot{I}_2,$$

а якщо $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = -\dot{E}_2$,

то

$$\dot{U}_2 = jX_M \dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_1 = jX_M \dot{I}_2.$$

Потужність, що передається з першої котушки на другу,

$$\underline{S}_{12} = \dot{U}_2 \dot{I}_2^* = P_{12} + jQ_{12},$$

де активна потужність $P_{12} = \omega M I_1 I_2$.

Потужність, що передається з другої котушки на першу,

$$\underline{S}_{21} = \dot{U}_1 \dot{I}_1^* = P_{21} + jQ_{21}.$$

Завжди активні потужності:

$$P_{12} = P_{21} = \omega M I_1 I_2.$$

7. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

7.6. Обчислення однорідних магнітних кіл

7.6.1. При обчисленні магнітних кіл виникають, як правило, дві задачі — *пряма* та *обернена*. Щодо *прямой задачі*, то звичайно задаються геометрія кола, матеріал та магнітний потік. Треба визначити магніторушійну силу. Щодо *оберненої задачі*, то звичайно задаються геометрія, матеріал та магніторушійна сила. Треба визначити магнітний потік.

7.6.2. Магнітне коло є однорідним, коли в усьому колі постійні B і H . Тобто на всіх ділянках кола один матеріал та однаковий переріз.

7.6.3. На рис. 7.8 наведено однорідне магнітне коло. Якщо розв'язують пряму задачу (задано матеріал, геометрію та магнітний потік; треба визначити магніторушійну силу), обчислюють:

а) за заданим потоком Φ — магнітну індукцію B :

$$B = \frac{\Phi}{S};$$

б) за кривою намагнічування — напруженість магнітного поля (рис. 7.9);

в) за законом повного струму — магніторушійну силу:

$$wl = Hl_{oc}.$$

7.6.4. Розв'язок оберненої задачі (задано матеріал, геометрію та магніторушійну силу; треба визначити магнітний потік) виконують таким чином:

а) за законом повного струму визначають напруженість магнітного поля:

$$H = \frac{wl}{l_{oc}};$$

б) за кривою намагнічування обчислюють магнітну індукцію;

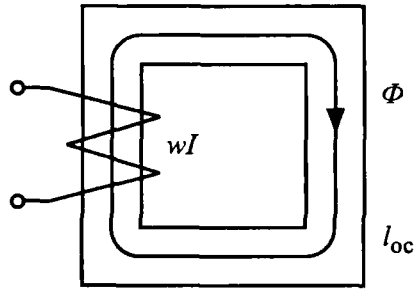


Рис. 7.8

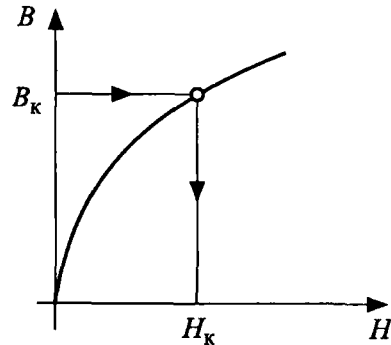


Рис. 7.9

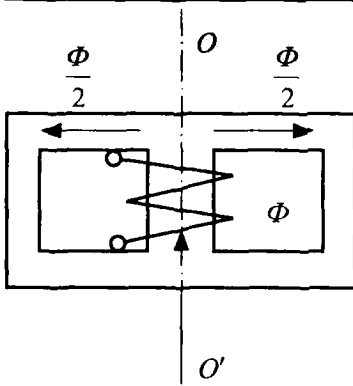


Рис. 7.10

в) магнітний потік обчислюють за співвідношенням:

$$\Phi = BS.$$

7.6.5. На рис. 7.10 наведено симетричне розгалужене магнітне коло (OO' — вісь симетрії). При розв'язуванні прямої та оберненої задач обчислюється лише половина кола. При цьому на ділянці з обмоткою магнітний потік дорівнює Φ . На ділянках без обмоток — береться потік, що дорівнює $\Phi/2$.

7.7. Обчислення неоднорідних магнітних кіл

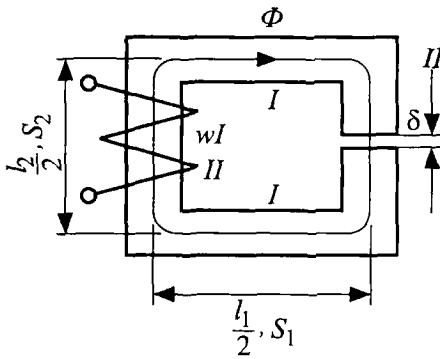


Рис. 7.11

7.7.1. На рис. 7.11 зображено нерозгалужене магнітне коло з неоднорідним магнітопроводом. Можна запропонувати такий порядок розв'язування прямої задачі (визначення магніторушійної сили):

- усе коло поділяється на однорідні ділянки (ділянки мають однаковий матеріал і рівні перерізи);
- за відомим потоком Φ визначається індукція на ділянках:

$$B_k = \frac{\Phi}{S_k};$$

в) індукція у зазорі дорівнює індукції сусідньої ділянки. Звичайно зазор є дуже малим, тому його переріз вважають рівним площі перерізу сусідньої ділянки:

$$B_0 = B_2;$$

г) за кривою намагнічування визначають напруженість на кожній ділянці;

7. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

д) напруженість у повітряному зазорі визначають за співвідношенням:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0};$$

е) за законом повного струму обчислюють магніторушійну силу:

$$wI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta.$$

7.7.2. Обернена задача (визначення магнітного потоку) розв'язується, як правило, таким чином:

а) задається магнітний потік Φ' і розв'язується пряма задача, тобто визначається $(wI)'$;

б) задається друге значення магнітного потоку Φ'' і також розв'язується пряма задача;

в) будується **магнітна характеристика кола** (залежність потоку від магніторушійної сили). За цією характеристикою визначається магнітний потік (рис. 7.12).

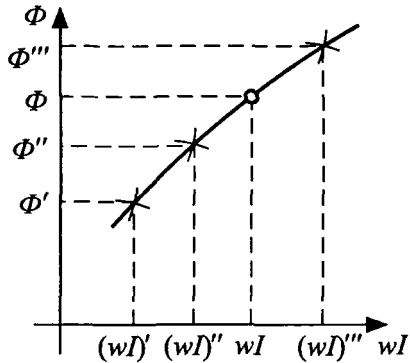


Рис. 7.12

7.7.3. На рис. 7.13 зображено несиметричне розгалужене неоднорідне магнітне коло. У прямій задачі звичайно задаються геометрія, матеріал та один із потоків. Треба визначити магніторушійну силу та інші потоки. Розв'язання можна провести за такою схемою:

а) складається рівняння за першим законом Кірхгофа щодо магнітних кіл:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0, \quad \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3;$$

б) складаються рівняння за другим законом Кірхгофа щодо магнітних кіл (закон повного струму щодо двох замкнених контурів):

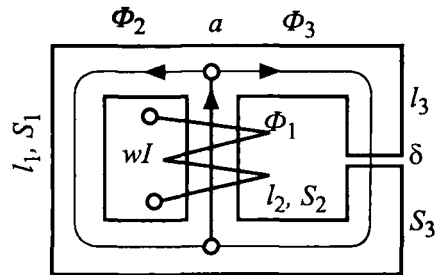


Рис. 7.13

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = wI, \quad H_3 l_3 + H_0 \delta - H_1 l_1 = 0;$$

складена система з трьох рівнянь має три невідомі (два потоки та магніторушійну силу):

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3;$$

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = wI;$$

$$H_3 l_3 + H_0 \delta - H_1 l_1 = 0;$$

в) за відомим потоком визначається індукція на ділянці.

Наприклад:

— якщо задано потік Φ_3 , визначають $B_3 = \Phi_3 / S_3$;

— за кривою намагнічування знаходять H_3 ;

— обчислюють індукцію та напруженість у зазорі:

$$(B_0 = B_3, H_0 = B_0 / \mu_0);$$

— визначають магнітну напругу між точками a і b (U_{ab}):

$$U_{ab} = H_3 l_3 + H_0 \delta;$$

— за U_{ab} обчислюють H_2 :

$$H_2 l_2 = U_{ab};$$

— за кривою намагнічування знаходять B_2 , а потім потік:

$$\Phi_2 = B_2 S_2;$$

— визначають невідомий потік:

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

У оберненій задачі, як правило, задається магніторушійна сила і тре-

ба визначити усі потоки. Обчислення здійснюють таким чином: кілька разів довільно задається один із потоків і розв'язуються прямі задачі. Потім будується сім'я магнітних характеристик (рис. 7.14). За допомогою сім'ї характеристик визначаються невідомі потоки. Потім виконують перевірку обчислення.

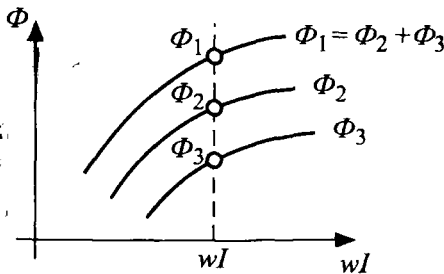


Рис. 7.14

7. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

7.8. Розрахунок підйомної сили електромагніта

7.8.1. Розрахунок підйомної сили електромагніта не є стандартною задачею обчислення магнітних кіл. Звичайно задається геометрія кола електромагніта та магнітна індукція (рис. 7.15). Треба визначити підйомну силу.

7.8.2. У загальному випадку електромагнітна сила визначається як градієнт

$$F = \frac{\partial W_M}{\partial x} \approx \frac{\Delta W_M}{\Delta x}.$$

Коли враховувати, що

$$\frac{\Delta W_M}{\Delta V} = \frac{B^2}{2\mu_a}, \quad \Delta V = S\Delta x,$$

то підйомну силу електромагніта можна визначити так:

$$\frac{\Delta W}{\Delta x} = F = \frac{B^2 S}{2\mu_a}.$$

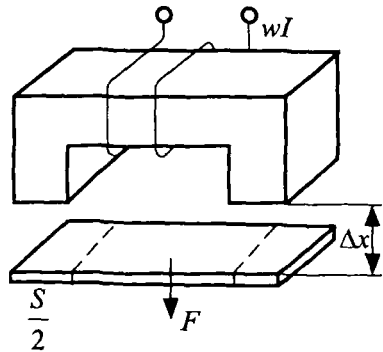


Рис. 7.15

8. МАГНІТНІ КОЛА ЗІ ЗМІННОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ

8.1. Основні поняття

8.1.1. У магнітних колах зі змінною магніторушійною силою магнітне поле збуджується котушками, що вмикаються до джерела змінної ЕРС. Змінний струм обмотки котушки спричиняє циклічне перемагнічування сталевго осердя.

Такі кола застосовуються:

- у трансформаторах;
- у електричних машинах змінного струму;
- у магнітних підсилювачах, дроселях, реле тощо.

8.1.2. Якщо котушку увімкнути на синусоїдну напругу і припустити, що увесь потік замикається тільки за осердям, то рівняння другого закону Кірхгофа буде таким:

$$u + e = iR.$$

Щодо розглядання найзагальніших закономірностей процесу, то можна знехтувати активним опором котушки. Якщо

$$u = U_m \sin \omega t, \quad e = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

можна записати рівняння кола:

$$U_m \sin \omega t = w \frac{d\Phi}{dt},$$

тобто
$$\Phi = -\frac{U_m}{w\omega} \cos \omega t + A,$$

де A — стала інтегрування, що характеризує якийсь постійний магнітний потік, що в усталеному режимі відсутній ($A = 0$). Взявши до уваги, що

$$\omega = 2\pi f,$$

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44,$$

$$-\cos \omega t = \sin(\omega t - \pi/2),$$

8. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою

можна одержати закон зміни магнітного потоку при увімкненні котушки на синусоїдну напругу:

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2),$$

$$\text{де } \Phi_m = \frac{U}{4,44 f w} \text{ — амплітуда потоку.}$$

При увімкненні котушки з осердям на синусоїдну напругу індуктується синусоїдний потік, що відстає від напруги на чверть періоду.

8.1.3 Синусоїдний магнітний потік індуктує ЕРС самоіндукції, тобто:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt};$$

$$e = -w \Phi_m \omega \cos \omega t;$$

$$e = w \Phi_m \omega \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$e = E_m \sin(\omega t - \pi/2).$$

При увімкненні котушки на синусоїдну напругу у котушці індуктується синусоїдна ЕРС самоіндукції, що відстає від потоку на чверть періоду.

8.1.4. Взявши до уваги, що $E_m = w \omega \Phi_m$,

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}},$$

$$\omega = 2\pi f,$$

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44,$$

можна визначити діюче значення ЕРС самоіндукції:

$$E = 4,44 \Phi_m f w.$$

Це рівняння трансформаторної ЕРС.

8.2. Змінний потік та струм у котушці

8.2.1. Синусоїдна напруга на затискачах котушки збуджує синусоїдний магнітний потік. Струм у котушці зв'язаний із потоком залежністю $\Phi = f(i)$, що повторює криву намагнічування $B = f(H)$.

Використовуючи ці залежності, можна графічно побудувати залежність струму у котушці від часу (рис. 8.1). Ця залежність має особливості:

- крива не має синусоїдного характеру;
- екстремуми струму збігаються з екстремумами магнітного потоку;
- у нульовій фазі крива струму випереджає криву магнітного потоку через вплив гістерезису.

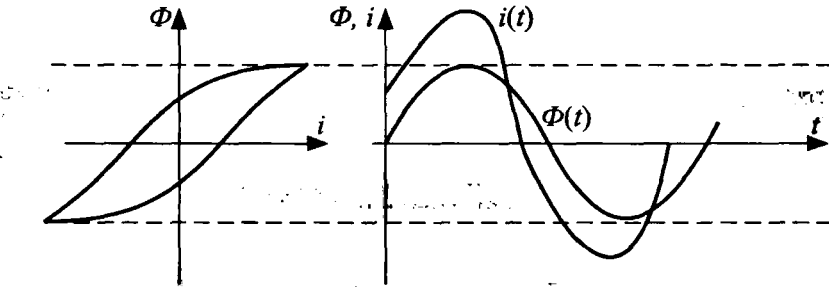


Рис. 8.1

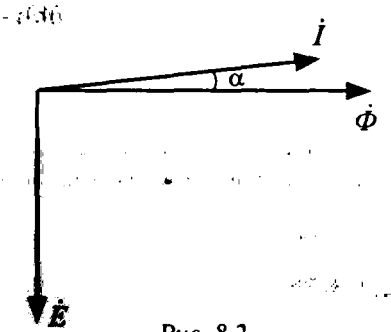


Рис. 8.2

8.2.2. Звичайно несинусоїдний струм, який намагнічує осердя, апроксимується синусоїдним, що має:

- діюче значення, дорівнене діючому значенню реального струму;
- вектор струму, котрий випереджає вектор магнітного потоку на кут магнітного запізнення α (рис. 8.2).

8.3. Магнітний потік розсіяння

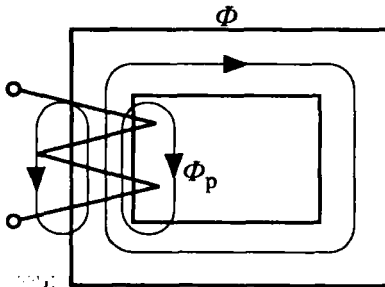


Рис. 8.3

8.3.1. Магнітний опір повітря дуже великий, і основний магнітний потік замикається через магнітопровід (осердя). Невелика частина потоку замикається через повітря. Цей потік має назву *потіку розсіяння* (рис. 8.3). Отже потік, зчеплений із котушкою, складається із потоку в осерді (Φ) та потоку розсіяння (Φ_p).

8. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою

Потік в осерді зв'язаний нелінійно із струмом і відстає від нього на кут магнітного запізнення. Потік розсіяння незначною мірою зв'язаний із магнітним осердям. Тому вважають, що він пропорційний струму та збігається зі струмом за фазою, тобто $\Phi_p \sim i$.

8.3.2. Після введення нового поняття “потік розсіяння” логічно випливають нові поняття:

$\Psi_p = w\Phi_p$ — *потокозчеплення розсіяння*;

$$e_p = -\frac{d\Psi_p}{dt} = -L_p \frac{di}{dt} \text{ — ЕРС розсіяння};$$

L_p — *індуктивність розсіяння*;

$X_p^p = L_p \omega$ — *індуктивний опір розсіяння*.

8.3.3. ЕРС розсіяння відстає від потоку на $\pi/2$. Її можна виразити у комплексній формі:

$$\dot{E}_p = -j\dot{I}X_p.$$

8.3.4. Використовуючи введені нові поняття, можна записати рівняння кола котушки (рівняння електричного стану) у миттєвих значеннях та у комплексній формі:

$$\begin{aligned} u + e + e_p &= iR, \\ \dot{U} + \dot{E} + \dot{E}_p &= \dot{I}R. \end{aligned}$$

Оскільки

$$\begin{aligned} \dot{E}_p &= -j\dot{I}X_p, \\ \dot{U} &= -\dot{E} + \dot{I}(R + jX_p). \end{aligned}$$

Вираз $R + jX_p = \underline{Z}$ називається повним внутрішнім опором котушки. Рівняння електричного стану котушки з осердям має вигляд:

$$\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}\underline{Z}.$$

8.4. Векторна діаграма котушки з осердям

8.4.1. Векторну діаграму котушки з осердям зручно розпочинати будувати з вектора магнітного потоку. Струм у котушці випереджає

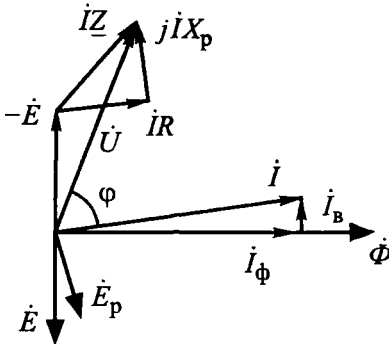


Рис. 8.4

вектор потоку на кут магнітного запізнення (рис. 8.4). Цей вектор розкладається на дві складові:

I_ϕ — струм, що намагнічує;

I_B — струм втрат у сталі від гістерезису та вихрових струмів.

$$I = \sqrt{I_\phi^2 + I_B^2}.$$

8.4.2. Вектор \dot{E} відстає на $\pi/2$ від вектора магнітного потоку, а \dot{E}_p — від вектора струму \dot{I} .

8.4.3. Якщо використати рівняння електричного стану котушки

$$\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}R + j\dot{I}X_p,$$

можна побудувати вектор напруги і визначити зсув фаз між струмом та напругою.

8.5. Втрати у сталі щодо змінного намагнічування

8.5.1. Втрати в осерді (втрати у сталі) складаються з:

- втрат від гістерезису;
- втрат від вихрових струмів.

8.5.2. Втрати від гістерезису щодо одного циклу перемагнічування пропорційні площі петлі гістерезису. Петля, яку одержують у експериментах зі змінним струмом, відрізняється від петлі, що одержана повільним перемагнічуванням постійним струмом. Звичайно втрати визначаються експериментальними співвідношеннями. Вони пропорційні масі осердя та частоті перемагнічування. Можна використати залежність

$$P_\Gamma = \sigma_\Gamma f B_m^n G_m,$$

де P_Γ — потужність втрат від гістерезису;

σ_Γ — гістерезисний коефіцієнт;

f — частота струму;

B_m — амплітуда магнітної індукції;

G_m — маса осердя.

8. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою

Показник степеня $1,6 < n < 2$ обирається в залежності від амплітуди магнітної індукції (якщо $B_m \geq 1 \text{ Тл}$, $n = 2$).

8.5.3. Змінний струм індукєє в осерді синусоїдний магнітний потік, що, у свою чергу, індукєє вихрові струми в осерді (рис. 8.5). Ці струми також індукєють магнітний потік, що послаблює основний потік згідно з правилом Ленца.

Основний потік послаблюється у центрі, тобто спостерігається явище витиснення потоку на поверхню осердя.

Таким чином, є втрати енергії:

— на утворення та функціонування вихрових струмів;

— від послаблення основного магнітного потоку.

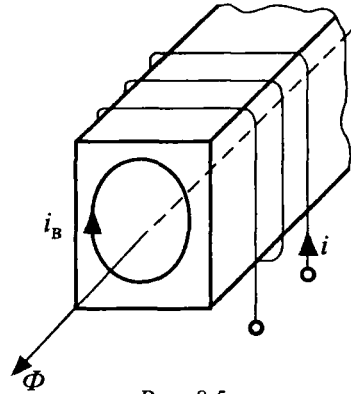


Рис. 8.5

Щоб зменшити втрати від вихрових струмів, осердя виготовляють шихтованим (складають із пластин електротехнічної сталі завтовшки 0,2...0,5 мм). Це зменшує шлях вихрових струмів, тобто зменшуються і втрати. Крім того, використовують матеріал осердя із домішкою кремнію. Ця домішка підвищує електричний опір феромагнетика і зовсім не змінює опору магнітного.

Втрати від вихрових струмів визначаються співвідношенням:

$$P_v = \sigma_v f^2 B_m^2 \gamma G_M,$$

де P_v — потужність втрат від вихрових струмів;

σ_v — коефіцієнт вихрових струмів (залежить від матеріалу і товщини листа);

γ — питома електрична провідність матеріалу осердя.

9. ТРАНСФОРМАТОРИ

9.1. Призначення та принцип роботи

9.1.1. Необхідність передачі електричної енергії на велику відстань спричинила створення єдиних енергетичних систем. У лініях електропередач втрачається від 10 до 15% електричної енергії, що виробляється. Щоб зменшити ці втрати, треба зменшити силу струму (втрати пропорційні квадрату сили струму), тобто підвищити напругу до сотень тисяч вольт. Підвищення напруги у процесі передачі електроенергії та зменшення її для використання здійснюється трансформаторами. У 1876 р. перший трансформатор побудував російський винахідник П. М. Яблочков.

9.1.2. *Трансформатор* — це електромагнітний апарат, що перетворює електричну енергію змінного струму з одними параметрами на електричну енергію з іншими параметрами. У трансформаторі перетворюються напруга, струм та початкова фаза. Незмінною залишається частота струму.

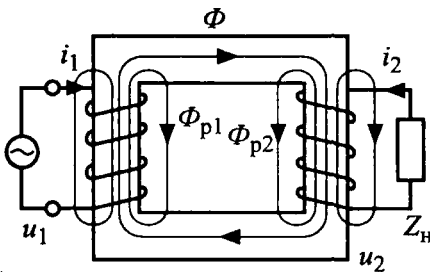


Рис. 9.1

9.1.3. Найпростіший трансформатор має магнітопровід (осердя) і обмотки. За кількістю обмоток трансформатори бувають двообмоткові та багатообмоткові. На рис. 9.1 наведено будову двообмоткового трансформатора. Обмотка із кількістю витків w_1 називається *первинною*. До затискачів

первинної обмотки підводиться електрична енергія. На затискачі *вторинної* обмотки вмикається споживач Z_H .

Первинна обмотка вмикається на синусоїдну напругу, у колі протікає струм, що апроксимується синусоїдою, діюче значення якої дорівнює діючому значенню дійсного струму і яка випереджає магнітний потік на кут магнітного запізнення.

9. Трансформатори

Змінний струм у первинному колі індукє основний магнітний потік Φ , що замикається у магнітопроводі, та потік розсіяння Φ_{p1} , що замикається у повітрі. Змінний магнітний потік Φ індукє ЕРС у первинній та вторинній обмотках. Якщо до вторинної обмотки увімкнути навантаження, то почне протікати струм I_2 , і виникне потік розсіяння вторинної обмотки Φ_{p2} , що замикається у повітрі.

9.1.4. Основний магнітний потік індукє ЕРС у первинній та вторинній обмотках:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Ці ЕРС збігаються за фазою та відстають від потоку на $\pi/2$.

Діючі значення ЕРС можна визначити за рівнянням трансформаторної ЕРС, тобто:

$$E_1 = 4,44\Phi_m f w_1;$$

$$E_2 = 4,44\Phi_m f w_2.$$

ККД трансформатора дуже великий, тому з достатньою точністю можна вважати, що

$$E_1 \approx U_1;$$

$$E_2 \approx U_2;$$

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2.$$

Якщо $U_1 > U_2$, то трансформатор називається знижуючим, а при $U_1 < U_2$ — підвищуючим.

Важливою характеристикою трансформатора є *коефіцієнт трансформації*, котрий визначається як відношення вищої напруги до нижчої в режимі холостого (неробочого) ходу.

9.1.5. Коефіцієнт трансформації для знижуючого трансформатора:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Із цього випливає, що трансформатор підвищує напругу і разом із тим знижує струм (та навпаки).

9.1.6. Первинне та вторинне кола трансформатора зв'язані тільки магнітним зв'язком, тобто кола електрично роз'єднані. Ця властивість трансформаторів використовується у розділених трансформаторах, що мають $K_T = 1$.

9.2. Неробочий (холостий) хід

9.2.1. *Неробочим ходом (режимом холостого ходу)* називається режим, за якого вторинне коло трансформатора розімкнене (навантаження вимкнене), тобто:

$$Z_H = \infty, \quad I_2 = 0.$$

Робота трансформатора у цьому режимі нагадує увімкнення котушки із сталевим осердям на синусоїдну напругу.

9.2.2. Струм первинного кола позначається I_0 і називається струмом неробочого (холостого) ходу. Рівняння первинного кола має вигляд:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{p0} = \dot{I}_0 R_1,$$

де R_1 — активний опір первинної обмотки,

E_{p0} — ЕРС розсіяння первинної обмотки неробочого (холостого) ходу.

Потік розсіяння Φ_{p1} незначною мірою зв'язаний із магнітним осердям, пропорційний струмові та збігається з ним за напрямком.

Оскільки

$$e_{p1} = -w_1 \frac{d\Phi_{p1}}{dt},$$

\dot{E}_{p0} відстає від струму на 90° , тобто

$$\dot{E}_{p0} = -j\dot{I}_0 X_{p1},$$

де X_{p1} — опір розсіяння первинної обмотки,

$$X_{p1} = L_{p1} \omega,$$

де L_{p1} — індуктивність розсіяння первинної обмотки.

Рівняння трансформатора у режимі неробочого (холостого) ходу можна привести до вигляду:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{p1}.$$

9. Трансформатори

Величина $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{p1}$ і називається повним внутрішнім опором первинної обмотки. В остаточному вигляді рівняння первинного кола буде таким:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \underline{Z}_1.$$

Векторна діаграма (рис. 9.2) повністю аналогічна діаграмі котушки із сталевим осердям. Струм неробочого ходу трансформатора представляють у вигляді активної та реактивної складових.

Якщо \dot{I}_{0p} — реактивна складова (струм, що намагнічує), \dot{I}_{0a} — активна складова (струм втрат), то

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2}.$$

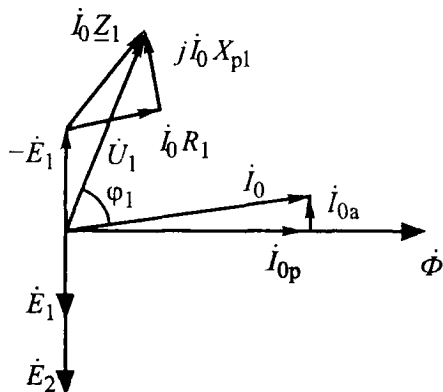


Рис. 9.2

Струм неробочого (холостого) ходу звичайно дуже малий і не перевищує кількох відсотків від номінального первинного струму.

9.3. Режим навантаження

9.3.1. **Режим навантаження** здійснюється, коли на вторинну обмотку увімкнено навантаження \underline{Z}_H . У вторинному колі протікає струм \dot{I}_2 . У цьому разі маємо три потоки:

- Φ — основний магнітний потік,
- Φ_{p1} — потік розсіяння первинної обмотки,
- Φ_{p2} — потік розсіяння вторинної обмотки.

За рівнянням трансформаторної ЕРС,

$$\text{Оскільки } E_1 \approx U_1, \quad E_1 = 4,44 \Phi_m f w_1.$$

$$\text{то} \quad \Phi_m \sim U_1.$$

У зв'язку з тим, що U_1 не залежить від режимів роботи трансформатора,

$$\Phi_m \neq f(\underline{Z}_H) = \text{const},$$

тобто **магнітний потік трансформатора не залежить від режимів роботи і є величиною сталою.**

9.3.2. Амплітуда магнітного потоку у режимах неробочому та навантаження однакова. Тому сума магніторушійних сил також не залежить від режимів роботи. Рівняння МРС у неробочому режимі та режимі навантаження має вигляд:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2.$$

Це **рівняння намагнічуючих сил.**

Якщо всі члени рівняння поділити на w_1 , то можна дістати співвідношення:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

Величина $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ називається **зведеним вторинним струмом.**

Співвідношення струмів трансформатора має вигляд:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2.$$

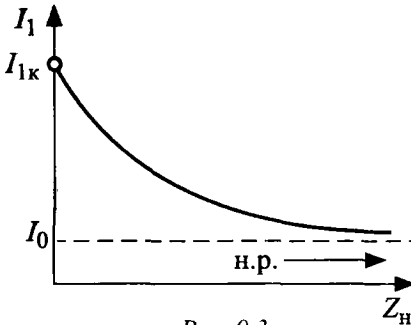


Рис. 9.3

9.3.3. Із співвідношення струмів випливає, що у неробочому режимі $\dot{I}'_2 = 0$, тобто $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$. У режимі навантаження струм \dot{I}_2 , за законом Ленца, спричиняє магнітний потік, що послаблює основний потік. Для того, щоб Φ_m залишався незмінним, у режимі навантаження зростає первинний струм \dot{I}_1 . На рис. 9.3 наведено залежність первинного струму від навантаження трансформатора.

9.3.4. Рівняння первинного кола має вигляд:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{p1} = \dot{I}_1 R_1.$$

Використавши наведені позначення

$$\dot{E}_{p1} = -j\dot{I}_1 X_{p1},$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{p1},$$

9. Трансформатори

можна дістати рівняння первинного кола у вигляді:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1.$$

Рівняння вторинного кола, за другим законом Кірхгофа, має вигляд:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{p2} = \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H.$$

Зручно ввести позначення, аналогічні величинам первинного кола:

$$\dot{E}_{p2} = -j\dot{I}_2 X_{p2},$$

де $X_{p2} = \omega L_{p2}$ — опір розсіяння вторинної обмотки,
 L_{p2} — індуктивність розсіяння вторинної обмотки. Рівняння вторинного кола у таких позначеннях:

$$\dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{p2} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_H.$$

Повний внутрішній опір вторинної обмотки:

$$R_2 + j\dot{I}_2 X_{p2} = \dot{I}_2 \underline{Z}_H,$$

а вторинна напруга (напруга на навантаженні):

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_H.$$

В остаточному вигляді рівняння вторинного кола буде таким:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2.$$

9.3.5. Отже, навантажений трансформатор описується такими рівняннями (співвідношення струмів, рівняння первинного та вторинного кіл):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2;$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2.$$

9.3.6. У режимі навантаження вторинна напруга U_2 незначною мірою залежить від струму навантаження. Ця залежність ($U_2 = f(I_2)$), наведена на рис. 9.4, називається *зовнішньою характеристикою*.

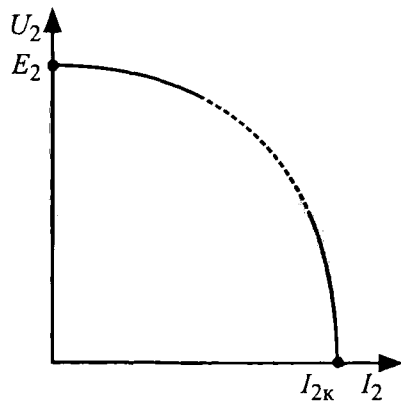


Рис. 9.4

Вона визначається при

$$U_1 = \text{const}, \quad \cos\varphi_2 = \text{const}.$$

У стандартах щодо трансформаторів нормується падіння напруги U_2 при номінальному струмі навантаження $I_2 = I_{2н}$.

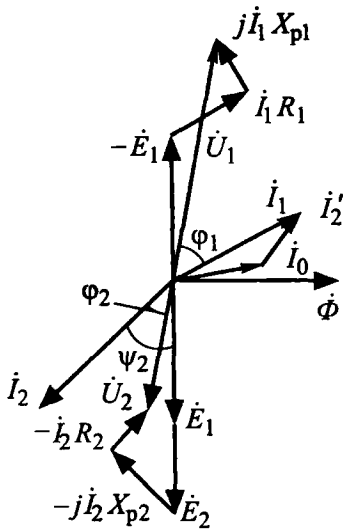


Рис. 9.5

9.3.7. Для побудови векторної діаграми навантаженого трансформатора (рис. 9.5) необхідно використати основні рівняння трансформатора. Порядок побудови векторної діаграми такий:

1. Будується вектор магнітного потоку.
2. Вектор струму неробочого ходу випереджає вектор потоку на кут магнітного запізнення і розпадається на активну та реактивну складові:

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2}.$$

3. Будуються вектори \dot{E}_1 та \dot{E}_2 , що відстають від потоку на 90° .

4. Визначається зсув фаз між струмом \dot{I}_2 та ЕРС \dot{E}_2

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_{p2} + X_H}{R_2 + R_H},$$

та будується вектор струму \dot{I}_2 .

5. За співвідношенням струмів

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$$

будується вектор первинного струму \dot{I}_1 .

6. За рівнянням вторинного кола

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{p2} - \dot{I}_2 R_2$$

будується вектор вторинної напруги \dot{U}_2 .

7. За рівнянням первинного кола

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{p1}$$

будується вектор напруги первинного кола.

8. Визначаються зсуви фаз φ_1 та φ_2 між струмами та напругами.

9.4. Режим короткого замикання

9.4.1. Треба відрізнити режим короткого замикання від досліду короткого замикання. Дослід короткого замикання проводять *при зниженій первинній напрузі*. Режим короткого замикання — це аварійний режим роботи трансформатора. У режимі короткого замикання напруга первинної обмотки дорівнює номінальній, а опір навантаження дорівнює нулеві.

В аварійному режимі короткого замикання встановлюються великі струми короткого замикання в обмотках $I_{1к}$ та $I_{2к}$. Ці значення настільки великі, що призводять до виходу з ладу обмоток трансформатора.

9.4.2. Зовнішня характеристика має падаючий вигляд. Відносна величина падіння напруги при номінальному струмі ($I_2 = I_{2н}$) нормується і позначається у паспорті трансформатора (e_k). Звичайно ця величина показує падіння напруги у відсотках. За допомогою e_k визначають струми короткого замикання:

$$I_{1к} = \frac{100}{e_k \%} I_{1н},$$

$$I_{2к} = \frac{100}{e_k \%} I_{2н}.$$

9.5. Втрати у трансформаторах

9.5.1. Потужність, що споживається трансформатором, —

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

а потужність, що передається у навантаження, —

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

ККД трансформатора визначається співвідношенням

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_1}.$$

Рівняння балансу активних потужностей має вигляд:

$$P_1 = P_2 + P_M + P_e,$$

де P_m — магнітні втрати (втрати у сталі);
 P_e — електричні втрати (втрати у міді), тобто:

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_e}.$$

9.5.2. Магнітні втрати (втрати у сталі) — це:

- втрати від гістерезису,
- втрати від вихрових струмів.

Магнітні втрати залежать лише від магнітного потоку і не залежать від сили струму в обмотках. Оскільки основний магнітний потік є сталим (він пропорційний первинній напрузі), втрати у сталі вважаються постійними. Отже, магнітні втрати не залежать від коефіцієнта завантаження трансформатора:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}.$$

Магнітні втрати визначаються експериментально або обчислюються за імперичними залежностями, наприклад:

$$P_m = P_{1,0/400} \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} G_m,$$

де $P_{1,0/400}$ — втрати у 1 кг сталі при індукції $B_m = 1$ Тл та частоті $f = 400$ Гц,

G_m — маса осердя.

9.5.3. Електричні втрати — це втрати в міді обмоток, тобто:

$$P_e = R_1(t^\circ) I_1^2 + R_2(t^\circ) I_2^2.$$

При визначенні втрат враховуються зміни активного опору обмоток від нагріву. Електричні втрати прямо пропорційні квадрату струму, тобто:

$$P_e = f(\beta) = f(I_2/I_{2H}).$$

Тому електричні втрати називають втратами змінними.

9.5.4. ККД трансформатора залежить від електричних втрат, тобто залежить від завантаження:

$$\eta_T = f(\beta).$$

9. Трансформатори

На рис. 9.6 наведено залежність ККД від потужності P_2 . Трансформатор проектується таким чином, що ККД досягає максимуму при найімовірнішому завантаженні. При цьому коефіцієнт завантаження дещо менший за одиницю. Можна довести, що максимальним ККД трансформатора при максимальному завантаженні буде, якщо $P_c = P_m$.

ККД трансформатора значною мірою залежить від потужності і досягає значень:

- 0,7...0,75 — у трансформаторах малої потужності (кілька ват),
- 0,9...0,95 — у трансформаторах середньої потужності,
- 0,95...0,995 — у трансформаторах великої потужності.

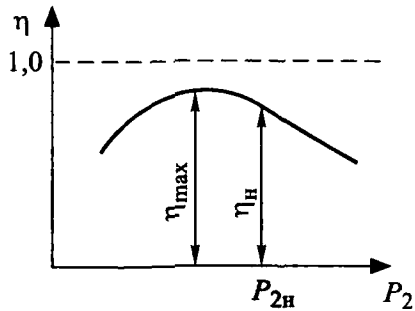


Рис. 9.6

9.6. Досліди неробочого (холостого) ходу та короткого замикання

9.6.1. Експериментально трансформатори випробовуються у межових режимах ($Z_n = 0$, $Z_n = \infty$).

Проводять два досліді:

- дослід неробочого (холостого) ходу;
- дослід короткого замикання.

Ці досліді дають змогу визначити вихідні дані щодо обчислення трансформатора. Дослід неробочого (холостого) ходу використовують як елемент технічного контролю. При цьому перевіряють потужність магнітних втрат, коефіцієнт трансформації, струм холостого ходу. Дослід короткого замикання дає змогу визначити електричні втрати, а також обчислити струм короткого замикання в умовах експерименту.

9.6.2. Дослід неробочого (холостого) ходу проводять при вимкненому навантаженні (рис. 9.7).

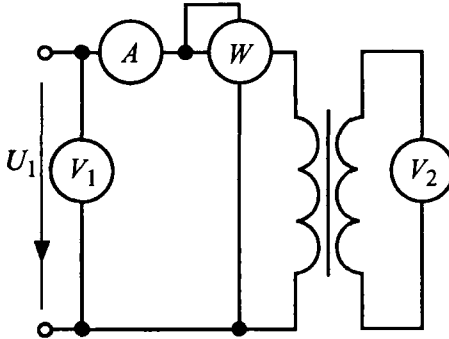


Рис. 9.7

де потужність P_1 вимірюється приладом W .

Потужність $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ дорівнює нулеві, тому що $I_2 = 0$.

Струм неробочого (холостого) ходу звичайно малий і дорівнює $(3...10)\% I_{1н}$. Тому вважають, що

$$P_e = I_0^2 R_1 \rightarrow 0.$$

У цьому випадку із рівняння балансу потужностей випливає:

$$P_1 = P_m.$$

Ватметр у досліді неробочого (холостого) ходу показує потужність втрат у сталі. Отже, у досліді неробочого (холостого) ходу визначаються магнітні втрати.

9.6.3. Дослід короткого замикання проводять при замкненому вторинному колі (рис. 9.8). Амперметр A_2 має внутрішній опір,

близький до нуля. Приладами A_1, V, W, A_2 вимірюють відповідно $I_{1к}, U_{1к}, P_1, I_{2к}$.

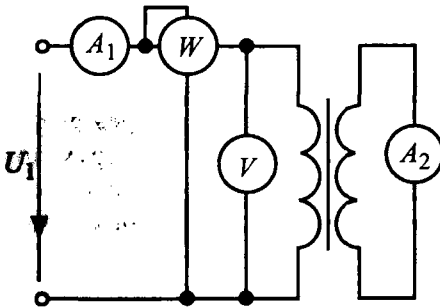


Рис. 9.8

Струм короткого замикання звичайно у 20...30 разів більший за номінальний. Тому дослід проводять при зниженій напрузі U_1 , настільки, щоб у вторинному колі протікав струм, який дорівнює номінальному. Коефіцієнт трансформації визначають за

Вольтметр V_2 має дуже великий опір, тобто вважають, що $Z_H \rightarrow \infty$. Приладами V_1, A, W, V_2 вимірюють U_0, I_0, P_1 та U_{20} .

Коефіцієнт трансформації визначають як

$$K_T = \frac{U_0}{U_{20}}.$$

Баланс активних потужностей визначається співвідношенням:

$$P_1 = P_2 + P_m + P_e,$$

9. Трансформатори

вимірними струмами:

$$k_T = \frac{I_{2K}}{I_{1K}}$$

У рівнянні балансу потужностей:

$$P_1 = P_2 + P_M + P_e,$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 0,$$

тому що $U_2 = 0$ ($Z_n = 0$).

Магнітні втрати пропорційні квадрату потоку, що також пропорційний U_1 , тобто:

$$P_M \sim k\Phi^2;$$

$$E_1 = 4,44\Phi_m f w_1;$$

$$E_1 \approx U_1;$$

$$\Phi \sim U_1.$$

Проводячи дослід при зниженій напрузі, магнітними втратами нехтують:

$$P_M \rightarrow 0.$$

Тоді із балансу потужностей випливає:

$$P_1 = P_e.$$

У досліді короткого замикання W_1 показує потужність втрат у міді. Отже, в досліді короткого замикання вимірюються електричні втрати.

9.7. Реальний, ідеалізований та зведений трансформатори

9.7.1. *Реальний трансформатор* має обмотки, розташовані на осерді. Обмотки мають як активний опір, так і опір розсіяння, тобто, крім основного магнітного потоку, що проймає обидві обмотки, є потоки розсіяння первинної та вторинної обмоток.

9.7.2. У теоретичному аналізі роботи трансформатора часто вживають термін “ідеалізований трансформатор”.

Ідеалізований трансформатор — це трансформатор, у котрого відсутні магнітні потоки розсіяння, а активні опори обмоток дорівнюють нулеві. Це поняття використовують для спрощених досліджень процесів.

9.7.3. У теоретичних дослідженнях і при побудові схеми заміщення трансформатора користуються також поняттям зведеного трансформатора.

Зведений трансформатор — це трансформатор, еквівалентний реальному, у якого коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці (кількість витків вторинної обмотки дорівнює кількості витків первинної обмотки). Для заміни реального трансформатора зведеним треба втримати принципи еквівалентності енергетичного стану. Зведені електричні величини позначаються штрихами.

9.7.4. Можна записати рівняння балансу енергії для зведеного і реального трансформатора:

$$\dot{E}_2 \dot{I}_2 = \dot{E}'_2 \dot{I}'_2,$$

тобто зведена ЕРС вторинної обмотки:

$$\dot{E}'_2 = \frac{\dot{E}_2 \dot{I}_2}{\dot{I}'_2},$$

а оскільки $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{1}{k_T}$,

то
$$\dot{E}'_2 = -\dot{E}_2 k_T.$$

У такий же спосіб можна записати рівняння балансу потужностей:

$$\dot{U}_2 \dot{I}_2 = \dot{U}'_2 \dot{I}'_2$$

і дістати вираз для зведеної напруги вторинної обмотки:

$$\dot{U}'_2 = -\dot{U}_2 k_T.$$

9.7.5. У загальному випадку зведені величини просто дістати множенням рівняння вторинного кола трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j \dot{I}_2 X_2$$

на коефіцієнт зведення (коефіцієнт трансформації k_T):

$$\dot{U}_2 k_T = \dot{E}_2 k_T - \dot{I}_2 R_2 k_T - j \dot{I}_2 X_2 k_T.$$

Це рівняння можна записати відповідно для зведеного трансформатора:

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j \dot{I}'_2 X'_2$$

9. Трансформатори

і знайти зведені величини:

$$\dot{U}'_2 = -\dot{U}_2 k_T;$$

$$\dot{E}'_2 = -\dot{E}_2 k_T;$$

$$R'_2 = R_2 k_T^2;$$

$$X'_2 = X_2 k_T^2;$$

$$Z'_2 = Z_2 k_T^2.$$

9.7.6. У такий же спосіб можна визначити і зведені параметри навантаження (загальний випадок):

$$Z'_H = Z_H k_T^2;$$

$$R'_H = R_H k_T^2;$$

$$L'_H = L_H k_T^2.$$

9.7.7. Таким чином, зведений трансформатор описується трьома рівняннями:

а) співвідношенням струмів:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2;$$

б) рівнянням первинного кола:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1;$$

в) рівнянням вторинного зведеного кола:

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2.$$

9.7.8. Треба враховувати, що зведена ЕРС вторинної обмотки дорівнює ЕРС первинної обмотки ($\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$).

Деякі автори підручників та монографій вводять поняття вторинного зведеного струму з протилежним знаком, що не змінює фізики процесів.

9.8. Схема заміщення трансформатора

9.8.1. Рівняння зведеного трансформатора — це рівняння розрахунку електричного кола з двома суміжними контурами, складеними за законами Кірхгофа. Адже:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$$

— це рівняння за першим законом Кірхгофа (для вузла електричного кола).

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1$$

— це рівняння, складене за другим законом Кірхгофа, для замкнутого контуру з ідеальними елементами, що мають параметри R_1, X_1 і забезпечують величини \dot{U}_1, \dot{E}_1 .

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2$$

— це також рівняння за другим законом Кірхгофа для замкнутого контуру з ідеальними елементами.

9.8.2. Спільний для суміжних контурів елемент, що індукує ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, повинен мати якийсь внутрішній опір

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0,$$

що забезпечує протікання в ньому струму холостого ходу. На рис. 9.9 наведено схему заміщення трансформатора, що відповідає рівнянням зведеного трансформатора.

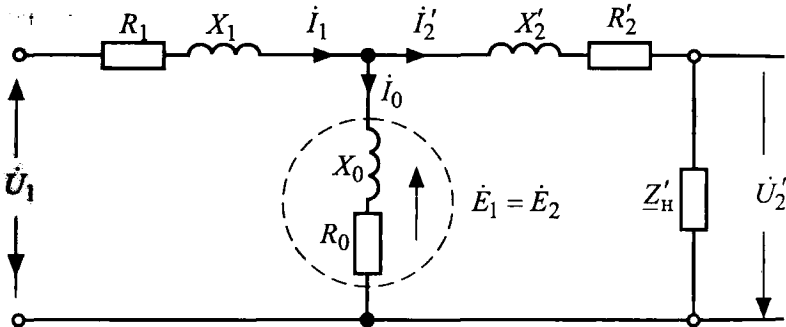


Рис. 9.9

Спільна ділянка схеми, якою проходить струм холостого ходу \dot{I}_0 , називається намагнічуючою віткою і заміщає дію основного магнітного потоку.

9.9. Робочі характеристики трансформатора

9.9.1. Для опису експлуатаційних властивостей трансформаторів застосовують такі **робочі характеристики**:

залежність $\cos \varphi_1 = f(\beta)$;

залежність $\eta = f(\beta)$;

9. Трансформатори

залежність $U_2 = f(\beta)$;

залежність $I_1 = f(\beta)$.

9.9.2. Характер зміни коефіцієнта потужності ($\cos \varphi_1$) від коефіцієнта завантаження трансформатора ($\beta = I_2/I_{2H}$) нагадує залежність ККД від потужності P_2 . На рис. 9.10 наведена залежність коефіцієнта потужності і вплив коефіцієнта потужності навантаження при активно-індуктивному навантаженні.

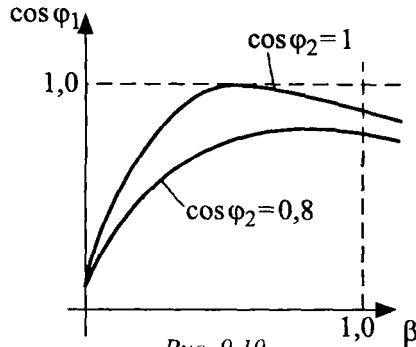


Рис. 9.10

9.9.3. Максимальний ККД потужних трансформаторів дуже високий (0,98 і більше). Оптимальний коефіцієнт завантаження звичайно менший за одиницю (рис. 9.11). Максимальний ККД забезпечується при рівних електричних та магнітних втратах у трансформаторі. Найімовірніше завантаження трансформаторів відповідає коефіцієнту $\beta = 0,5 \dots 0,7$.

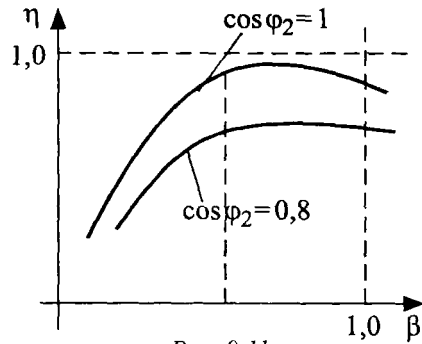


Рис. 9.11

Для серійних трансформаторів оптимальний коефіцієнт завантаження $\beta = 0,4 \dots 0,5$ (при якому ККД набуває максимального значення).

Максимум ККД виявлений слабо, тобто зберігає відносно стає значення в широких межах коефіцієнта завантаження ($0,5 < \beta < 1,5$).

9.9.4. Залежність $U_2 = f(\beta)$ називається зовнішньою характеристикою трансформатора. Вигляд зовнішньої характеристики залежить від особливостей завантаження, і при ємнісному завантаженні вона може бути навіть зростаючою (рис. 9.12).

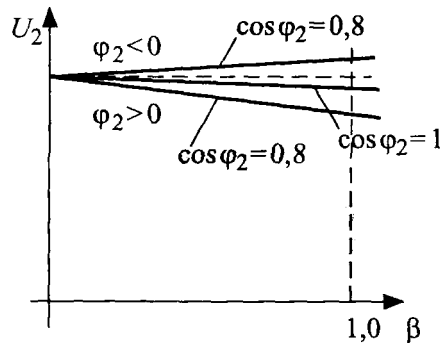


Рис. 9.12

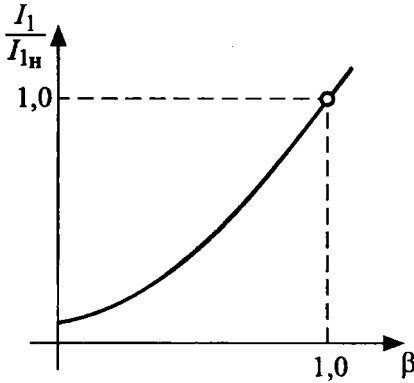


Рис. 9.13

На рис. 9.13 наведено залежність, що характеризує зростання струму I_1 від завантаження трансформатора.

9.10. Конструкція трансформатора

9.10.1. Для зменшення втрат від вихрових струмів осердя трансформатора набирається із листів електротехнічної сталі, завтовшки

0,35...0,5 мм, тобто осердя трансформатора роблять *шихтованим*. Сталь у своєму складі має кремній, що підвищує електричний опір і не впливає на магнітний опір.

9.10.2. Магнітопровід (осердя) трансформатора (рис. 9.14) буває трьох типів:

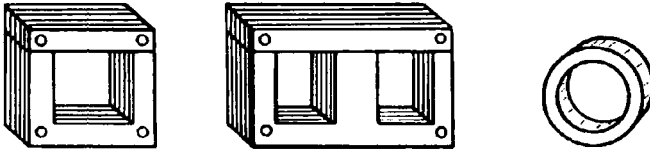


Рис. 9.14

- стержньове;
- броньове;
- тороїдне.

Стержньове осердя набирається з П-подібних ізольованих пластин трансформаторної сталі.

Позначається стержньове осердя як

П20 x 45,

де П — тип осердя;

20 — ширина стержня, мм;

45 — товщина пакета, мм.

Броньове осердя набирається із Ш-подібних пластин. Обмотки розташовуються концентрично на центральному стержні. У позначенні

Ш20 x 45:

9. Трансформатори

- Ш — тип осердя (броньовий);
- 20 — ширина центрального стержня, мм;
- 45 — товщина пакета, мм.

Тороїдне осердя менш технологічне. Звичайне тороїдне осердя виготовляється нешихтованим. Позначається осердя цього типу таким чином:

О60 х 40 х 10,

- де О — тип осердя (тороїдне);
- 60 — зовнішній діаметр тора, мм;
- 40 — внутрішній діаметр осердя, мм;
- 10 — висота тора, мм.

9.10.3. Осердя усіх типів можуть виготовлятися із феромагнітної стрічки (рис. 9.15). Це більш технологічне виконання. У цьому разі до позначень додається літера “Л”.

Наприклад:

ПЛ, ШЛ, ЛО.

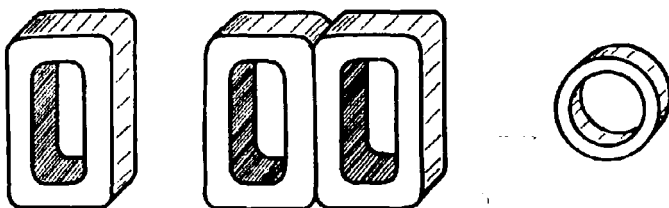


Рис. 9.15

9.11. Основні співвідношення для розрахунків

9.11.1. Для обчислення трансформатора треба зв'язати електричні параметри із геометричними характеристиками. Основна електрична величина, що задається при обчисленні трансформатора, — потужність P_2 .

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

а оскільки при активному навантаженні $\varphi_2 \rightarrow 0$, $P_2 \approx U_2 I_2$.

9.11.2. З великою точністю вважають, що

$$U_2 = E_2.$$

За рівнянням трансформаторної ЕРС

$$E_2 = 4,44\Phi_m f w_2;$$

$$\Phi_m = B_m S_0 K_c,$$

де K_c — коефіцієнт заповнення осердя сталлю. Ця величина таблична, вона відрізняється від одиниці через наявність лаку між пластинами та нещільністю їх стиснення. Звичайно $K_c = 0,9 \dots 0,96$.

S_0 — площа перерізу осердя.

ЕРС вторинної обмотки можна визначити співвідношенням:

$$E_2 = 4,44\Phi_m f w_2 B_m S_0 K_c.$$

9.11.3. Струм вторинного кола (навантаження) I_2 залежить від геометричних розмірів обмотки,

тобто $I_2 = j g_2,$

де j — допустима густина струму у провідникові [А/мм²],

g_2 — площа перерізу провідника вторинної обмотки [мм²].

9.11.4. Вважають, що у двообмотковому трансформаторі кожна обмотка займає половину площі вікна, тобто

$$w_2 g_2 = \frac{1}{2} S_B K_M,$$

де S_B — площа вікна,

K_M — коефіцієнт заповнення вікна міддю (враховує щільність обмотки, ізоляцію та інше). K_M — величина таблична.

$$g_2 = \frac{I_2}{j},$$

тобто

$$w_2 \frac{I_2}{j} = \frac{1}{2} S_B K_M,$$

або

$$I_2 = \frac{1}{2} S_B j \frac{K_M}{w_2}.$$

9.11.5. Із виразу для потужності

$$P_2 = I_2 U_2 \approx I_2 E_2$$

9. Трансформатори

підстановкою співвідношень для I_2 та E_2 можна одержати:

$$P_2 = \frac{1}{2} S_0 K_M j \frac{1}{w_2} 4,44 f w_2 B_m S_B K_c,$$

тобто

$$S_0 S_B = \frac{P_2}{2,22 j B_m f K_c K_M}.$$

9.11.6. Це співвідношення є основною залежністю, що зв'язує геометричні та електромагнітні параметри трансформатора. Габарити трансформатора та його маса пропорційні $S_0 S_B$. Тобто при визначеній потужності габарити та масу трансформатора можна зменшити:

- підвищенням допустимої густини струму;
- підвищенням магнітної індукції;
- підвищенням частоти струму.

9.12. Обчислення трансформатора

9.12.1. Будемо розглядати трансформатори малої потужності, що не мають примусової системи охолодження.

9.12.2. Для обчислення перш за все визначають співвідношення $S_0 S_B$, що зв'язує геометричні та електромагнітні параметри трансформатора:

$$S_0 S_B = \frac{P_2}{2,22 j B_m f K_c K_M},$$

$P_2 = I_2 U_2$ — звичайно задана;

B_m, j — беруться за довідниками. Звичайно $B_m = 0,5 \dots 0,6$ Тл (режим магнітного насичення щодо визначеного матеріалу та частоти);

$j = 3 \dots 8$ А/мм² для міді;

K_c та K_M — величини табличні;

f — частота струму, звичайно задана.

9.12.3. За $S_0 S_B$ та за довідником визначають стандартні розміри осердя.

9.12.4. За рівнянням трансформаторної ЕРС розраховують число витків у обмотках:

$$w_1 = \frac{U_1}{4,44 f B_m S_0 K_c},$$

$$w_2 = \frac{U_2}{4,44 f B_m S_0 K_c},$$

де S_0 — переріз стандартного осердя, визначений за таблицею в залежності від $S_0 S_B$.

9.12.5. Визначається переріз проводів первинної та вторинної обмоток:

$$g_1 = \frac{I_1}{j}, \quad g_2 = \frac{I_2}{j}.$$

9.12.6. Визначивши w_1 , w_2 , g_1 та g_2 , перевіряють розташування обмоток у вікні:

$$w_1 g_1 = \frac{1}{2} S_B K_M, \quad w_2 g_2 = \frac{1}{2} S_B K_M.$$

Якщо обмотки не розташовуються у вікні, вибирають більш стандартне осердя і повторюють розрахунки w_1 , w_2 , g_1 , g_2 .

9.12.7. Визначають втрати у міді та втрати у сталі за відомими співвідношеннями. Для обчислення P_c використовують значення R_1 та R_2 .

9.12.8. Визначають нагрів трансформатора:

$$\Delta t = \frac{P_M + P_c}{\alpha S_{\text{охол}}},$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі;

$S_{\text{охол}}$ — поверхня охолодження трансформатора.

Перевіряють

$$\tau_{\text{max}} \geq \tau_{\text{от}} + \Delta t,$$

де τ_{max} — максимальна температура обмоток, що допускається;

$\tau_{\text{от}}$ — температура оточуючого середовища.

9.13. Трифазні трансформатори

9.13.1. Трифазний струм можна трансформувати трьома однофазними або одним трифазним трансформатором. На рис. 9.16 наведено схематичне зображення трифазних трансформаторів, що з'єднані Y/Y та Y/Δ . Звичайно первинна обмотка позначається великими літерами, а вторинна — малими. Початки обмоток позначаються A, B, C, a, b, c , кінці — X, Y, Z, x, y, z .

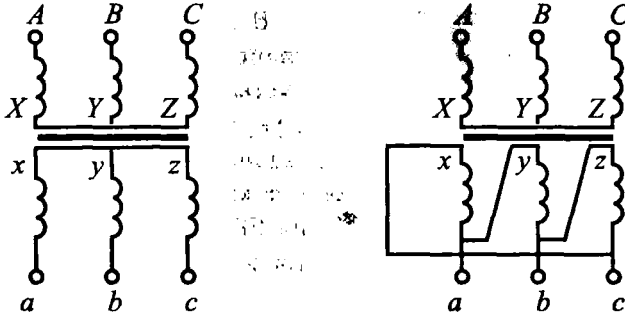


Рис. 9.16

9.13.2. Стандартом нормується кілька схем з'єднання. Приклад позначення:

Y/Y — 12 — “зірка” — “зірка”,

Y/Δ — 11 — “зірка” — “трикутник”,

Y/Y₀ — 12 — “зірка” — “зірка” із нулем.

Числа 11 і 12 показують групу з'єднання та характеризують взаємне розташування векторів вищої та нижчої лінійної напруги. Кут між векторами первинної та вторинної лінійної напруги дорівнює куту між годинною та хвилинною стрілками у визначений час. Коли група є 12, цей кут дорівнює 360°, при 11 — 330°.

9.13.3. У трифазних трансформаторах розрізняють два коефіцієнти трансформації — фазний та лінійний.

Для трифазного трансформатора *фазним коефіцієнтом трансформації* називають відношення фазних напруг первинної та вторинної обмоток у режимі холостого ходу, тобто:

$$k_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Лінійний коефіцієнт трансформації трифазного трансформатора — це відношення лінійних напруг в режимі холостого ходу, тобто:

$$k_{\text{л}} = \frac{U_{1\text{л}}}{U_{2\text{л}}}.$$

У разі з'єднання за схемами Y/Y та Δ/Δ коефіцієнти трансформації рівні ($k_{\text{л}} = k_{\phi}$). Якщо схема з'єднання обмоток Y/Δ, то $k_{\text{л}} = \sqrt{3}k_{\phi}$, а при

з'єднанні Δ/Y — $k_{\text{л}} = \frac{k_{\phi}}{\sqrt{3}}$.

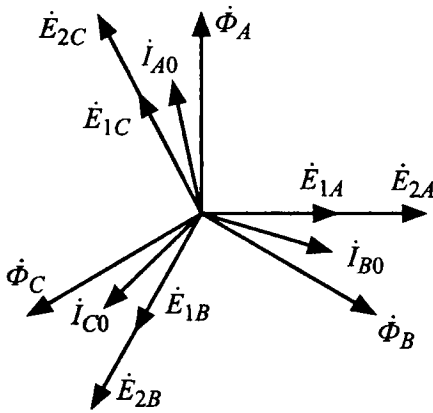


Рис. 9.17

Векторна діаграма трифазного трансформатора (рис. 9.17) будується на векторах потоків, що зсунуті на 120° . Струми неробочого (холостого) ходу випереджають потоки на кут магнітного запізнення. ЕРС обмоток відстають від векторів потоків на 90° . Отже,

$$E_A = -\frac{d\psi_A}{dt}$$

9.14. Багатообмоткові трансформатори

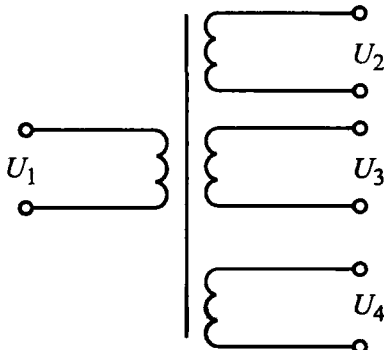


Рис. 9.18

9.14.1. Щоб одержати змінний струм різної напруги, використовують багатообмоткові трансформатори.

Багатообмоткові трансформатори мають кілька вторинних обмоток із різною кількістю витків, у яких індуються різні ЕРС.

9.14.2. Багатообмоткові трансформатори часто використовують у радіоприладах. На рис. 9.18 подано схему багатообмоткового трансформатора.

9.15. Вимірювальні трансформатори

- 9.15.1. Основним завданням вимірювальних трансформаторів є:
- ізоляція вимірювальних приладів та апаратів автоматичного захисту від кола високої напруги, для безпеки вимірювання;
 - розширення меж вимірювання вимірювальних приладів.
- Вимірювальні трансформатори бувають двох типів:
- трансформатори напруги;
 - трансформатори струму.

9. Трансформатори

9.15.2. Первинна обмотка (обмотка вищої напруги) **трансформатора напруги** вмикається як вольтметр на вимірювану напругу U_1 (рис. 9.19). На вторинну обмотку вмикається вольтметр та кола напруги інших приладів. Отже,

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

або $U_1 = k_T U_2$.

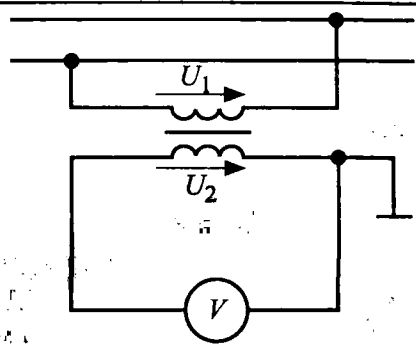


Рис. 9.19

9.15.3. Первинною обмоткою **трансформатора струму** є сама лінія (рис. 9.20). Вторинну обмотку замикають на амперметр та кола струму інших вимірювальних приладів. Отже,

$$k_T = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{k_T}$$

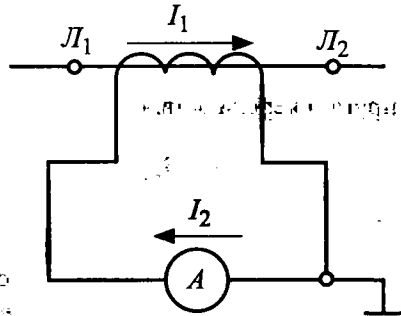


Рис. 9.20

9.16. Автотрансформатори

9.16.1. В автотрансформаторах первинна і вторинна обмотки зв'язані електрично, тобто **обмотка низької напруги є частиною обмотки високої напруги**.

На рис. 9.21 наведено схему автотрансформатора, де Ax — первинна обмотка з числом витків w_1 , ax — вторинна обмотка із числом витків w_2 .

$$k_{a.T} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

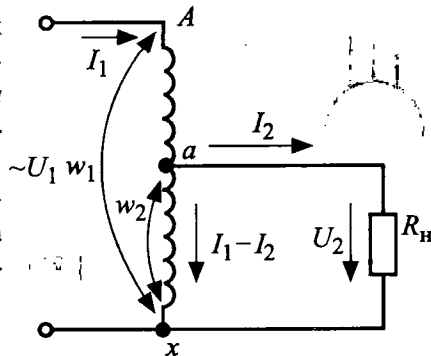


Рис. 9.21

Спільна частина обмотки ax виготовляється проводом меншого перерізу, оскільки по ньому проходить струм $I_1 - I_2$.

Тому у автотрансформаторах значно заощаджується мідь та зменшені втрати (лише одна обмотка). Переваги автотрансформатора збільшуються, коли спільна частина обмотки велика, тобто при наближенні коефіцієнта трансформації до одиниці. Звичайно у автотрансформаторів

$$k_{a,т} = 1,1 \dots 2,$$

і вони мають дуже високий ККД.

9.16.2. Автотрансформатори мають недоліки:

- при високих $k_{a,т}$ автотрансформатор стає не вигідним;
- електричний зв'язок кіл обмежує використання автотрансформаторів для живлення високої напруги.

У випадку пробою ізоляції на навантаження подається повна напруга джерела живлення.

9.17. Зображення трансформаторів на електричних схемах

9.17.1. За стандартом використовують три способи умовних графічних позначень трансформаторів:

- спрощений однолінійний;
- спрощений багатолінійний;
- розгорнутий.

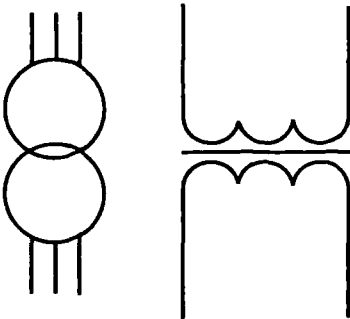


Рис. 9.22

Спрощеним однолінійним способом користуються порівняно рідко. У спрощених позначеннях обмотки зображаються у вигляді кіл. У однолінійному способі виводи позначають однією лінією із зазначенням кількості виводів.

9.17.2. У спрощеному багатолінійному способі обмотки зображуються у вигляді кіл, але виводи позначаються повністю. Виводи можна зображати з будь-якого боку. У розгорнутих позначеннях обмотки зображаються у вигляді

9. Трансформатори

ланцюжків півкіл. На рис. 9.22 наведено спрощене багатолінійне зображення трифазного трансформатора та розгорнуте позначення однофазного трансформатора з осердям.

9.17.3. На спрощених лінійних позначеннях трифазних трансформаторів звичайно вказують спосіб з'єднання обмоток. На рис. 9.23 наведені позначення трансформаторів із різним з'єднанням обмоток.

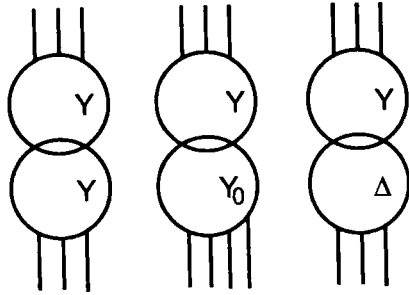


Рис. 9.23

10. АСИНХРОННІ МАШИНИ

10.1. Будова та принцип роботи

10.1.1. Трифазні асинхронні машини були розроблені у 1888 р. М. О. Доліво-Добровольським. Асинхронна машина — це машина змінного струму, в котрій збуджується обертове магнітне поле. Ротор обертається асинхронно, тобто із швидкістю, що відрізняється від швидкості поля.

Асинхронні машини принципово можуть бути генераторами або двигунами. Характеристики асинхронних двигунів дуже добрі, і вони широко застосовуються в техніці. Асинхронні генератори майже не використовуються, тому що мають дуже низькі експлуатаційні якості.

Асинхронні двигуни за своєю простотою, надійністю та ефективністю дістали широкого розповсюдження. Понад 85% усіх електродвигунів — це трифазні асинхронні двигуни.

Асинхронна машина складається із статора і ротора. Статор має шихтоване осердя, у пазах якого розташована трифазна обмотка. У найпростішому випадку вона складається із трьох котушок, що зсунуті одна до одної на 120° .

Ротор буває двох типів:

- короткозамкнений;
- фазний.

Короткозамкнений ротор має шихтований циліндр із пазами. У пази укладаються стержні, замкнені електрично з обох боків кільцями. Ці кільця та стержні М. О. Доліво-Добровольський назвав “білячим колесом” (рис. 10.1).

На рис. 10.2 наведено будову асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором. Оскільки на роторі немає колекторного

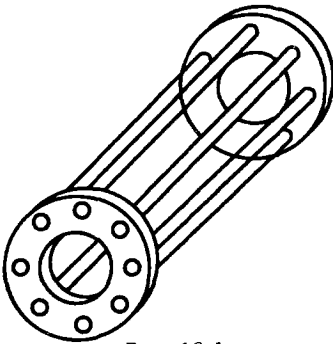


Рис. 10.1

10. АСИНХРОННІ МАШИНИ

вузла, ротор не має ковзних контактів, двигун дуже простий щодо обслуговування, надійний у роботі, дешевий, легкий та економічний. Це двигун “основного виконання”.

10.1.2. За стандартом передбачені спрощений та розгорнений способи графічного позначення асинхронних машин. У спрощеному способі обмотки статора та ротора зображаються у вигляді кіл. У розгорнутих позначеннях обмотка статора зображається у вигляді ланцюжка півкіл, а обмотка ротора — у вигляді кола.

На рис. 10.3 наведено спрощене та розгорнене графічне зображення короткозамкненого асинхронного двигуна. На рис. 10.4 наведено спрощене та розгорнене позначення асинхронної машини з фазним ротором.

В обох випадках обмотка статора з'єднана у “трикутник”.

10.1.3. Трифазна обмотка статора створює *обертове магнітне поле*. Швидкість обертання поля залежить тільки від частоти струму та кількості пар полюсів обмотки статора:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

де n_1 — швидкість обертання поля (об/хв);

f_1 — частота струму в обмотці статора;

p — число пар полюсів.

Обертове магнітне поле перетинає стержні “білячого колеса” і наводить у них ЕРС. Оскільки стержні замкнені кільцями, ЕРС індукує в них струм. Взаємодія обертового магнітного поля із струмом у стержнях

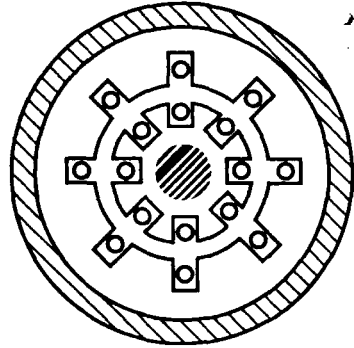


Рис. 10.2

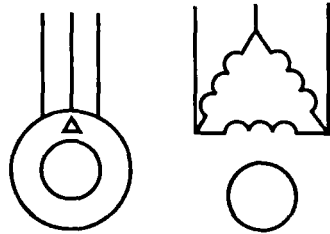


Рис. 10.3

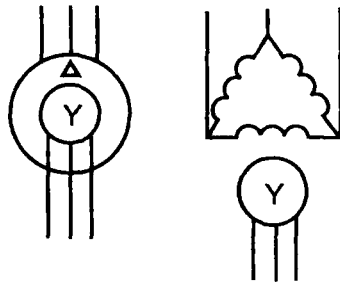


Рис. 10.4

створює обертальний електромагнітний момент. Якщо ротор розігнати до швидкості обертового поля, то магнітні силові лінії не перетинатимуть стержнів і не буде наводитися ЕРС.

У цьому разі не створюватиметься обертальний електромагнітний момент. Тобто машина працює тільки тоді, коли

$$n_1 \neq n_2,$$

де n_1 — швидкість обертання поля (об/хв — синхронна швидкість);

n_2 — швидкість обертання ротора (об/хв — асинхронна швидкість).

10.1.4. Взагалі асинхронна машина, як і всі електричні машини, оборотна, тобто при

$n_1 > n_2$ машина працює у *режимі двигуна*;

$n_1 < n_2$ машина працює у *режимі генератора*;

$n_1 = n_2$ — штучний режим *ідеального неробочого (холостого) ходу*.

Якщо поле обертається в один бік, а ротор обертається сторонньою силою в інший бік, то машина працює у *режимі електромагнітного гальма*.

10.1.5. Вводять величину S (ковзання), що характеризує асинхронність:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Ця величина визначається у частках одиниці або відсотках і коливається у межах 0,02...0,05.

10.2. Обертове магнітне поле

10.2.1. Обертове магнітне поле створюється обмоткою статора, що складається із трьох котушок. Ці котушки розташовані під кутом 120° одна до одної, і на них подається трифазна синусоїдна напруга. Тобто у котушках проходять струми, зсунуті один до одного на 120° (рис. 10.5). Можна розглянути моменти часу, коли фазні струми сягають максимальних значень. Із таблиці видно, що максимальний струм не збігається за напрямом із двома іншими фазними струмами.

10. Асинхронні машини

10.2.2. Три котушки статорної обмотки (початки A, B, C , кінці x, y, z) розташовані під кутом 120° (рис. 10.6). Відповідно до таблиці на рисунку зображені напрями струмів. Якщо об'єднати провідники з однаковим напрямом струмів, можна зобразити магнітне поле статора. Це поле буде обертатися відповідно до частоти струму, тобто:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

Таким чином, кутова частота обертання дво полюсного поля дорівнює кутовій частоті струму в обмотці статора.

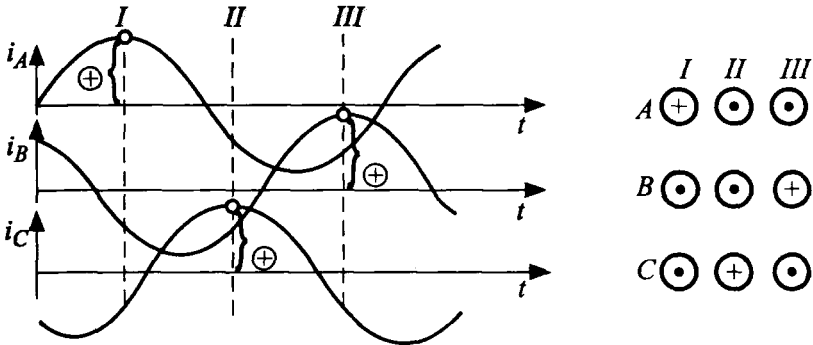


Рис. 10.5

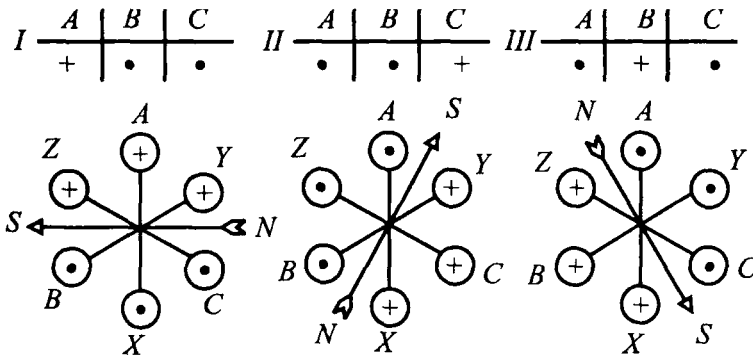


Рис. 10.6

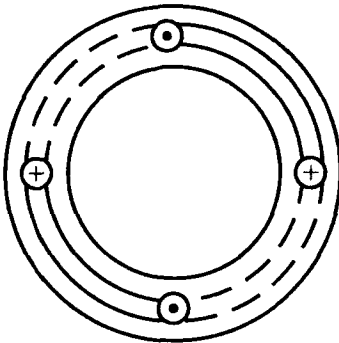


Рис. 10.7

10.2.3. Якщо у кожну фазу обмотки статора увімкнути по дві котушки (витки укласти не через 180° , а через 90° , як наведено на рис. 10.7), то можна одержати чотириполюсне поле. Це поле обертається у два рази повільніше, тому що у цьому разі $p = 2$ (дві пари полюсів). Можна і далі збільшувати кількість пар полюсів, збільшуючи кількість котушок у кожній фазі. Таким чином створюється багатополюсне обертове магнітне поле.

10.3. Струм та ЕРС короткозамкненої обмотки

10.3.1. Обертове магнітне поле індукуює ЕРС в статорній та роторній обмотках.

За рівнянням трансформаторної ЕРС у обмотці статора, —

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_o \Phi_m,$$

де k_o — обмотувальний коефіцієнт, що враховує падіння ЕРС внаслідок розподіленого виконання обмотки (величина таблична, звичайно коливається у межах 0,92...0,97).

10.3.2. У загальмованій (нерухомій) роторній обмотці ($n_2 = 0$) ЕРС можна визначити також за рівнянням трансформаторної ЕРС:

$$E_{2н} = 4,44 f_1 w_2 k_o \Phi_m,$$

де $E_{2н}$ — ЕРС нерухомої обмотки ротора;

$$f_1 = \frac{pn_1}{60} \text{ — частота струму в обмотці статора.}$$

Якщо ротор обертається, то частота ЕРС, що індукуються в обмотці ротора, залежить від його швидкості щодо швидкості обертання поля, тобто

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60},$$

де $n_1 - n_2$ — число обертів ротора щодо числа обертів поля.

Цей вираз можна помножити і поділити на n_1 та дістати:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_2} = Sf_1.$$

За рівнянням трансформаторної ЕРС:

$$E_2 = 4,44 f_2 w_2 k_o \Phi_m,$$

але, з урахуванням, що $f_2 = Sf_1$,

$$E_2 = E_{2H} S.$$

10.3.3. У двох граничних випадках:

— при розгоні ротора $S = 1$ ($n_2 = 0$), $E_2 = E_{2H}$;

— якщо ротор наздогнав поле, $S = 0$ ($n_2 = n_1$), $E_2 = 0$.

На рис. 10.8 наведено залежність ЕРС ротора від швидкості обертання ротора. Максимальна ЕРС наводиться у момент розгону ротора.

Роторна обмотка має опір:

— R_2 — активний;

— $X_2 = \omega_2 L_2$ — розсіяння.

Оскільки

$$\omega_2 = S\omega_1, \quad X_2 = \omega_1 S L_2.$$

Струм у роторній обмотці:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}.$$

Зазвичай струм у роторній обмотці визначають співвідношенням

$$I_2 = \frac{E_{2H} S}{\sqrt{R_2^2 + (\omega_1 S L_2)^2}}.$$

Максимальний струм встановлюється при пускові двигуна, тобто при $S = 1$. При розгоні ротора струм зменшується, а якщо $S = 0$, $I_2 = 0$.

Треба пам'ятати, що *максимальний струм протікає в обмотці ротора при пускові двигуна.*

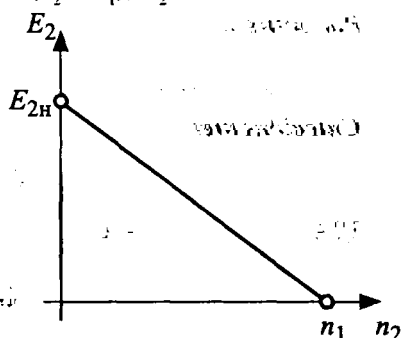


Рис. 10.8

10.4. Рівняння асинхронного двигуна

10.4.1. Фізичні моделі асинхронної машини та трансформатора аналогічні. Тому ці машини описуються аналогічними математичними рівняннями, тобто щодо асинхронного двигуна, то йому відповідають три основні рівняння трансформатора.

10.4.2. Основні рівняння асинхронного двигуна:

- рівняння кола статора;
- рівняння кола ротора;
- співвідношення струмів.

Рівняння кола статора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1.$$

Рівняння кола ротора:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2.$$

Співвідношення струмів:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2.$$

10.4.3. Струм \dot{I}_0 — струм ідеального неробочого (холостого) ходу двигуна, тобто струм статора, коли струм ротора дорівнює нулеві. Третє рівняння (рівняння магнітної рівноваги) впливає таким чином:

$$\dot{I}_1 w_1 m_1 k_1 + \dot{I}_2 w_2 m_2 k_2 = \dot{I}_0 w_1 m_1 k_1,$$

де m_1 та m_2 — число фаз у обмотках;

k_1 та k_2 — обмотувальні коефіцієнти.

Якщо поділити ліву та праву частини на $w_1 m_1 k_1$, можна дістати:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2,$$

де $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{w_2 m_2 k_2}{w_1 m_1 k_1}$ — зведений струм роторної обмотки.

10.4.4. Із третього рівняння впливає важливий висновок. **Статорний струм** (струм, що споживається двигуном) **буде максимальним під час пуску двигуна**. Це тому, що у момент пуску максимальних значень набуває струм ротора. Пусковий струм у 4...7 разів більший за номінальний.

10.5. Зведення величин і параметрів асинхронних машин

10.5.1. За аналогією з трансформатором можна ввести поняття зведеного асинхронного двигуна. *Зведений асинхронний двигун* — це така гіпотетична машина, у котрій ЕРС ротора дорівнює ЕРС статора і витримується баланс потужностей та електричних втрат реального й зведеного ротора.

10.5.2. За визначенням зведений струм фази ротора:

$$I'_2 = -I_2 \frac{w_2 m_2 k_2}{w_1 m_1 k_1}.$$

Величина

$$k_i = \frac{w_1 m_1 k_1}{w_2 m_2 k_2}$$

називається *коефіцієнтом зведення струмів*. Враховуючи, що $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ і баланс потужності

$$m_2 \dot{I}_2 \dot{E}_2 = m_1 \dot{I}_1 \dot{E}_1$$

або

$$m_2 \dot{I}_2 \dot{E}_2 = m_1 \dot{I}'_2 \dot{E}'_2,$$

можна отримати

$$\dot{E}'_2 = -\dot{E}_2 k_e,$$

де $k_e = \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2}$ називається *коефіцієнтом зведення ЕРС*.

Якщо розглянути баланс втрат реального та зведеного ротора

$$m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2',$$

то

$$R_2' = k R_2.$$

де $k = k_i k_e$ — називається *коефіцієнтом зведення опорів*.

10.5.3. Таким чином, при зведенні величин і параметрів кола ротора використовують *три коефіцієнти зведення*:

$$k_i = \frac{w_1 m_1 k_1}{w_2 m_2 k_2} \text{ — коефіцієнт зведення струмів;}$$

$k_e = \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2}$ — коефіцієнт зведення ЕРС;

$k = k_i k_e$ — коефіцієнт зведення опорів.

10.5.4. Для зведеного асинхронного двигуна записують зведені величини і параметри:

$I'_2 = -I_2 \frac{1}{k_i}$ — зведений струм ротора;

$\dot{E}'_2 = -\dot{E}_2 k_e$ — зведена ЕРС ротора;

$R'_2 = R_2 k$ — зведений активний опір фазної обмотки ротора;

$X'_2 = X_2 k$ — зведений опір розсіяння фазної обмотки ротора.

Треба знати, що для двигуна з короткозамкненою обмоткою (“біляче колесо”) беруть $w_2 = 0,5$, $k_2 = 1$, $m_2 = z_2$, де z_2 — кількість пазів ротора.

10.5.5. Введені коефіцієнти зведення слушні для схеми, що аналогічна трансформаторові. Отже, зведений двигун являє собою машину з загальмованим ротором.

Зведений асинхронний двигун описується рівняннями:

— співвідношення струмів:

$$I_1 = I_0 + I'_2;$$

— рівнянням кола статора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1;$$

— рівнянням зведеного кола ротора:

$$\dot{E}'_2 = I'_2 R'_2 + j I'_2 X'_2.$$

10.6. Схема заміщення асинхронної машини

10.6.1. Аналітичні дослідження асинхронних машин дуже утруднені, тому що:

— між обмотками статора і ротора є тільки магнітний зв'язок, а ЕРС і струми в обмотках мають різні частоти через наявність асинхронності;

— число фаз обмоток статора і ротора може бути різним.

Дуже зручно досліджувати асинхронні машини за допомогою *схеми заміщення*.

10. Асинхронні машини

10.6.2. Схему заміщення тільки із магнітним зв'язком наведено на рис. 10.9. У цьому разі виконуються рівняння кола статора і ротора. Співвідношення струмів

$$I_1 = I_0 + I'_2,$$

що випливає із рівняння МРС, дає змогу у схемі заміщення замінити магнітний зв'язок електричним.

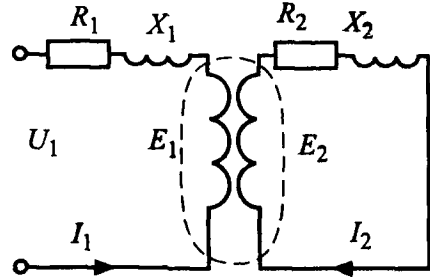


Рис. 10.9

10.6.3. Струм ротора визначається співвідношенням:

$$I_2 = \frac{E_{2н} S}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}.$$

Якщо поділити чисельник і знаменник на ковзання S , можна одержати:

$$I_2 = \frac{E_{2н}}{\sqrt{(R_2/S)^2 + X_{2н}^2}}.$$

де $X_{2н} = \omega_1 L_2 = \frac{X_2}{S}$ — реактивний опір нерухомого ротора.

Цьому виразу відповідає схема заміщення ротора, наведена на рис. 10.10.

Опір R_2/S можна визначити у вигляді двох складових —

$$R_2 \text{ та } R_2 \frac{1-S}{S}.$$

Перший опір не залежить від режиму роботи, а другий залежить від ковзання, тобто від моменту опору на валу двигуна. Дійсний обертовий ротор замінюється нерухомим, у коло якого вмикається активний опір, що залежить від швидкості обертання ротора двигуна.

Якщо розглядати коло зведеного ротора, то можна аналізувати роботу двигуна з активним опором обмотки ротора R'_2 і активним навантаженням $R'_2 \frac{1-S}{S}$, що залежить від ковзання.

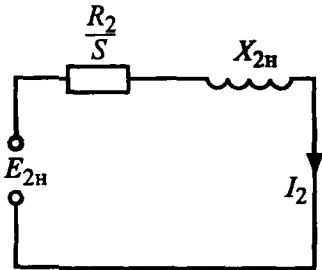


Рис. 10.10

У цьому випадку коло зведеного ротора описується рівнянням:

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 R'_2 + \dot{I}'_2 \frac{(1-S)}{S} R'_2 + j\dot{I}'_2 X'_2.$$

Залишаються рівняння кола статора та співвідношення струмів:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_2. \end{aligned}$$

Цим трьом рівнянням відповідає схема заміщення, наведена на рис. 10.11.

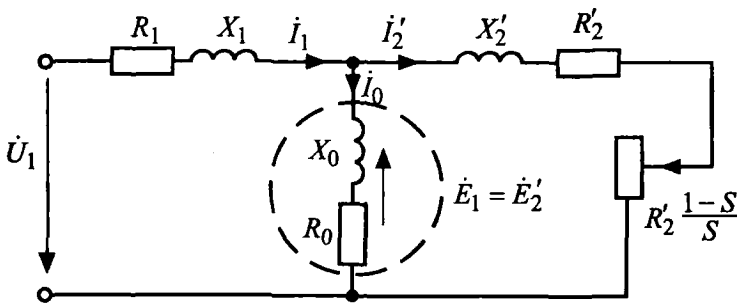


Рис. 10.11

Як і у схемі заміщення трансформатора, спільна ділянка схеми, якою проходить струм ідеального холостого ходу, називається намагнічуючою віткою і заміщає дію основного магнітного потоку.

Спільний для суміжних контурів елемент індукує ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, має внутрішній опір

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0,$$

що забезпечує протікання струму ідеального холостого ходу.

10.7. Векторна діаграма асинхронного двигуна

10.7.1. Векторна діаграма будується за допомогою основних рівнянь асинхронних машин:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_2. \end{aligned}$$

10.7.2. Векторну діаграму асинхронного двигуна наведено на рис. 10.12. Порядок побудови векторної діаграми може бути таким:

1. Будується вектор магнітного потоку.
2. Струм неробочого (холостого) ходу випереджає вектор потоку на кут магнітного запізнення.
3. Вектори ЕРС статора та ЕРС ротора відстають від вектора потоку на 90° .
4. Якщо знайти кут зсуву струму ротора стосовно вектора ЕРС ротора

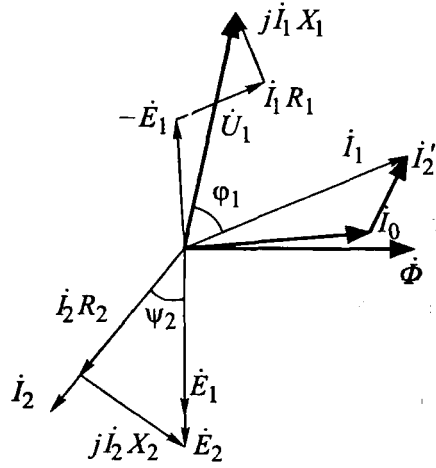


Рис. 10.12

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2},$$

можна побудувати вектор \dot{I}_2 .

5. Визначається вектор \dot{E}_2 за рівнянням:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2.$$

6. Будується вектор зведеного струму —

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{1}{K_i} = -\dot{I}_2 \frac{w_2 m_2 k_2}{w_1 m_1 k_1}$$

і знаходиться вектор струму статора —

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2.$$

7. За рівнянням кола статора —

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1$$

визначається вектор напруги \dot{U}_1 .

8. Визначається кут зсуву φ_1 .

10.8. Втрати потужності та ККД асинхронного двигуна

10.8.1. Потужність, що споживається двигуном —

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

де m_1 — кількість фаз обмотки статора.

Потужність на валу двигуна (корисна потужність):

$$P_2 = M_2 \omega_2.$$

Рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$P_1 = P_2 + \sum P,$$

де $\sum P$ — сумарні втрати.

ККД асинхронного двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P}.$$

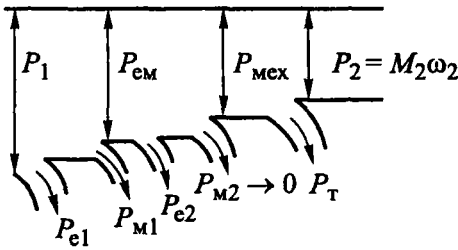


Рис. 10.13

10.8.2. Звичайно втрати в електричних машинах вивчають за енергетичними діаграмами.

На рис. 10.13 наведено енергетичну діаграму асинхронного двигуна. З енергетичної діаграми випливає висновок про втрати потужності:

а) $P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1$ — електричні втрати у статорі;

б) $P_{m1} = P_{1,0} / 400 \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f_1}{400} \right)^{1,5} G_m$ — магнітні втрати у статорі;

в) $P_{e2} = P_{em} - P_{mех} = M(\omega_1 - \omega_2) = P_{em} S$ — електричні втрати у роторі;

г) P_{m2} — магнітні втрати у роторі. Ці втрати пропорційні частоті $f_2 = S f_1$. При промисловій частоті та $S = 0,03 \dots 0,05$ втрат майже немає, отже $P_{m2} \rightarrow 0$;

10. Асинхронні машини

д) P_T — втрати від тертя та на охолодження машини.

Електромагнітна потужність визначається співвідношеннями

$$P_{ем} = M\omega_1,$$

$$P_{ем} = P_1 - P_{e1} - P_{m1}.$$

Механічна потужність —

$$P_{мех} = M\omega_2.$$

10.8.3. ККД двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1},$$

а струм, що споживається двигуном, —

$$I_1 = \frac{P_2}{m_1 \eta I_1 \cos \phi_1}.$$

Чим більший $\cos \phi_1$ (коефіцієнт потужності), тим меншим буде струм, що споживає двигун. У асинхронних двигунів $\cos \phi_1 = 0,75 \dots 0,95$. Намагаються робити малі зазори між статором і ротором. Це зменшує індуктивність та реактивну потужність, тобто збільшує $\cos \phi_1$.

10.8.4. Загальні втрати у двигуні залежать від навантаження, тому й ККД двигуна залежить від його навантаження (рис. 10.14). Двигуни конструюються таким чином, що максимальний ККД забезпечується при навантаженні, дещо меншому за номінальне. Звичайно ККД асинхронних двигунів досить високий і сягає 80...90%. У потужних двигунах ККД вищий й досягає 90...96%.

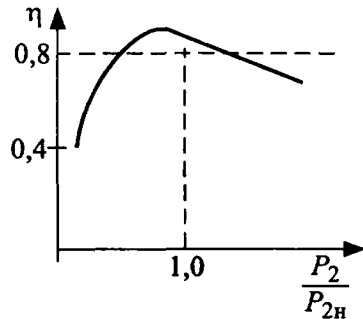


Рис. 10.14

10.9. Електромагнітний момент

10.9.1. У статор асинхронного двигуна надходить із мережі потужність

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1.$$

Частина цієї потужності втрачається у статорі (електричні та магнітні втрати статора). У ротор надходить *електромагнітна потужність*

$$P_{\text{ем}} = M\omega_1,$$

де M — електромагнітний або обертальний момент асинхронного двигуна.

Якщо врахувати втрати потужності у роторі, то механічну потужність можна визначити за аналогічною формулою:

$$P_{\text{мех}} = M\omega_2.$$

Електромагнітна потужність більша за механічну на величину втрат у роторі. Оскільки магнітні втрати у роторі наближаються до нуля,

$$P_{\text{ем}} - P_{\text{мех}} = M(\omega_1 - \omega_2);$$

$$M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 S;$$

$$M\omega_1 S = m_2 I_2^2 R_2;$$

$$M = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{\omega_1 S},$$

де m_2 — число фаз обмотки ротора.

10.9.2. Втрати у роторі можна визначити за допомогою ЕРС і струму обмотки ротора:

$$m_2 I_2^2 R_2 = M\omega_1 S = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2,$$

де ψ_2 — зсув фаз між ЕРС та струмом.

За рівнянням трансформаторної ЕРС, —

$$E_2 = 4,44 f_1 S w_2 \Phi_m,$$

електромагнітний момент можна визначити за формулою:

$$M = \frac{4,44 m_2 f_1 w_2 S}{\omega_1 S} \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Величина

$$C = \frac{4,44 m_2 f_1 w_2}{\omega_1}$$

називається *сталюю машини* і залежить тільки від конструктивних

10. Асинхронні машини

особливостей машини. Тому остаточний вираз електромагнітного моменту має вигляд:

$$M = C \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний магнітному потоку та струму ротора. Треба враховувати, що

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{X_2}{R_2}.$$

10.9.3. Поряд із терміном “електромагнітний момент” часто вживається термін “обертальний момент”. Взагалі це не одне й те саме. Обертальний момент на валу двигуна дещо менший за електромагнітний через механічні та додаткові втрати. В машинах середньої та великої потужності ці втрати порівняно невеликі. Якщо ними нехтувати, то можна вважати, що обертальний момент дорівнює електромагнітному.

10.10. Механічна характеристика

10.10.1. Як вже було показано, втрати в обмотці ротора —

$$P_{\text{ем}} - P_{\text{мех}} = M(\omega_1 - \omega_2)$$

або

$$M\omega_1 S = 3I_2^2 R_2$$

для трифазного двигуна.

Якщо виходити з принципу зведення величин (виконання балансу втрат реального і зведеного ротора), то можна визначити електромагнітний момент за допомогою зведених величин:

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_1 S}.$$

Струм ідеального холостого (неробочого) ходу звичайно невеликий, тому для аналізу залежності у схемі заміщення (рис. 10.11) можна винести намагнічуючий контур на вхідні затискачі. З достатньою точністю можна визначити зведений струм ротора:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}},$$

тому що
$$\frac{R'_2}{S} = R'_2 + R'_2 \frac{1-S}{S}.$$

Рівняння залежності $M(S)$, а її також називають механічною характеристикою, має такий остаточний вигляд:

$$M = \frac{3U_1^2 R'_2}{\omega_1 S \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}.$$

10.10.2. Можна проаналізувати залежність $M(S)$ і дійти висновку:

- а) функція (M) визначена в області $-\infty < S < +\infty$;
- б) в режимі ідеального холостого ходу ($S = 0$) електромагнітний момент відсутній;
- в) крива має два екстремуми (що встановлюються прирівненням похідної $\frac{dM}{dS}$ до нуля) при критичному ковзанні;
- г) критичне ковзання визначається:

$$S_{\text{кр}} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}},$$

де знак “+” відповідає режиму двигуна, а знак “-” — режиму генератора;

д) максимальний момент визначається відповідно для двигуна і генератора як

$$M_{\text{max}} = \frac{3U_1^2}{2\omega_1 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]};$$

е) можна знехтувати активним опором статора і дістати приблизні співвідношення (спрощена формула Клосса):

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S}},$$

$$S_{\text{кр}} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}.$$

10. Асинхронні машини

10.10.3. Наведені рівняння дають змогу побудувати механічні характеристики.

Природною механічною характеристикою називається характеристика двигуна з короткозамкненим ротором (опір обмотки ротора практично дорівнює нулеві).

Штучна характеристика — це характеристика двигуна з опором обмотки ротора $R_2 > 0$ (фазний ротор).

10.10.4. При аналітичних дослідженнях асинхронних машин використовується **залежність електромагнітного моменту від ковзання** (рис. 10.15). Як і усі електричні машини, асинхронна машина оборотна. У режимі $0 < S < 1$ вона працює як **двигун**. За негативними значеннями ковзання (швидкість ротора більша за швидкість обертання поля) машина працює як **генератор**. Якщо зовнішня сила обертає ротор проти напрямку обертання поля ($S > 1$), то машина працює як **електромагнітне гальмо**. При цьому електромагнітний момент перешкоджатиме обертанню ротора.

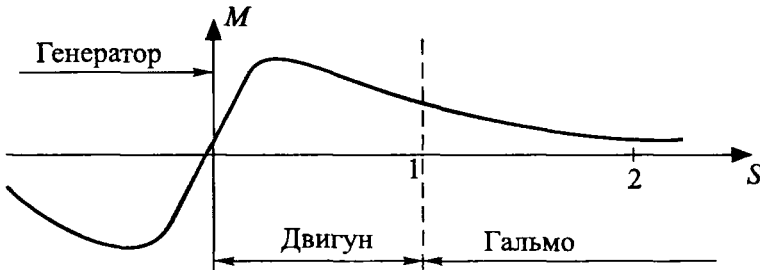


Рис. 10.15

10.10.5. Можна розглядати зв'язок електромагнітного моменту із ковзанням тільки для режиму двигуна (рис. 10.16). Ця крива має явний максимум при критичному ковзанні. Цей максимум поділяє криву на області стійкої і нестійкої роботи. Звичайно номінальне значення ковзання $S_n = 0,02 \dots 0,05$, критичне ковзання $S_{кр} = 0,1 \dots 0,2$. При $S = 1$ — пуск двигуна. Пусковий момент звичайно менший за номінальний.

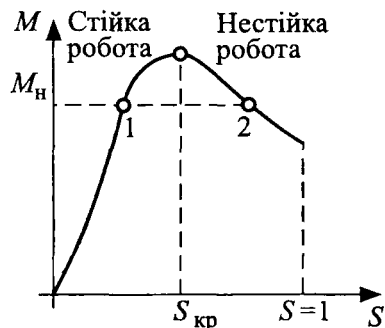


Рис. 10.16

Тому необхідно, щоб момент опору був меншим за пусковий, тобто $M_n > M_0$. Таким чином, *двигун доцільно пускати розвантаженим*. Можна розглянути роботу двигуна в області стійкої роботи (точка 1) та в області нестійкої роботи (точка 2):

- у точці 1 збільшення M_0 зменшує оберти n_2 , збільшує S , тобто збільшується електромагнітний момент (це стійка робота);
- у точці 2 збільшення M_0 зменшує електромагнітний момент, тобто $M < M_0$, і ротор зупиниться. Це нестійка робота.

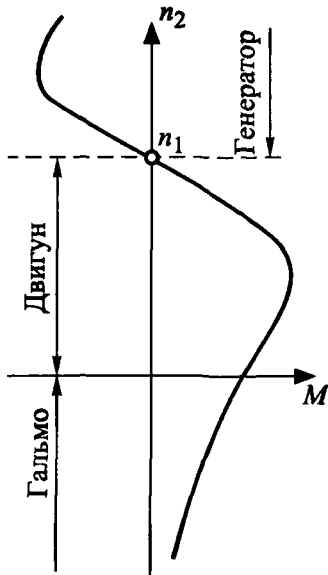


Рис. 10.17

Механічна характеристика — це залежність швидкості обертання ротора від електромагнітного моменту, тобто $n_2 = f(M)$. Цю залежність можна одержати перебудовою залежності $M = f(S)$ у інші координати (рис. 10.17). Режим двигуна здійснюється тоді, коли

$$0 < n_2 < n_1.$$

Якщо швидкість обертання ротора більша за швидкість обертання поля ($n_2 > n_1$), то здійснюється режим *генератора*. За режимом *електромагнітного гальма* ротор і поле обертаються в різні боки ($n_2 < 0$).

10.10.6. Механічна характеристика асинхронного двигуна наведена на рис. 10.18. При $n_2 = 0$ здійснюється пуск двигуна. При $S = 0$ (ротор наздогнав поле) $n_2 = n_1$ та $M = 0$.

У межах $0 < S < S_{кр}$ швидкість обертання незначно залежить від моменту опору. Ця частина характеристики вважається *жорсткою*. У межах $S_{кр} < S < 1$ механічна характеристика відповідно *м'яка*.

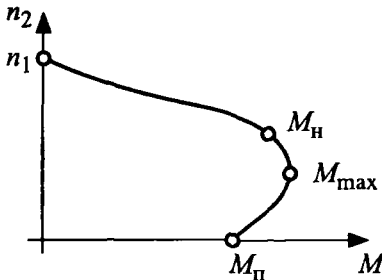


Рис. 10.18

10.10.7. Зазвичай у асинхронних двигунах номінальний момент складає

$$M_{\text{н}} \approx 0,5M_{\text{max}}.$$

Максимальний момент *не залежить від активного опору ротора*. Сійкість роботи двигуна характеризується його переважувальною спроможністю:

$$\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}}.$$

Для двигунів із короткозамкненим ротором $\lambda = 1,7 \dots 2,8$.

Критичне ковзання можна також визначити з формули Клосса:

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{н}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

10.11. Робочі характеристики асинхронного двигуна

10.11.1. Робочими характеристиками асинхронного двигуна називаються залежності від потужності P_2 або від коефіцієнта заванта-

ження $\left(\frac{P_2}{P_{2\text{н}}} \right)$:

- частоти обертання ротора n_2 (або ковзання);
- коефіцієнта корисної дії;
- коефіцієнта потужності ($\cos\phi$);
- струму статора I_1 ;
- моменту на валу M_2 .

Робочі характеристики визначають експериментально або будують теоретично при сталих напрузі на статорі ($U_1 = \text{const}$) і частоті ($f_1 = \text{const}$).

Робочі характеристики будують для області сійкої роботи двигуна (від $S = 0$ до $S > S_{\text{н}}$ на 10...20%).

10.11.2. З метою зменшення втрат потужності в роторі та підвищення ККД двигуни проектують із невеликим номінальним ковзанням. Тому залежність $n_2 = f\left(\frac{P_2}{P_{2\text{н}}}\right)$, що називається швидкісною характеристикою,

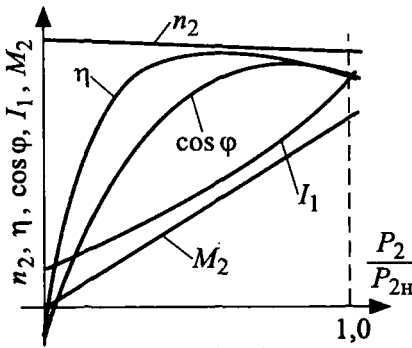


Рис. 10.19

є жорсткою (рис. 10.19). Отже, частота обертання ротора при переході від холостого ходу до номінального навантаження зменшується незначно (на 2...6%).

10.11.3. Залежності ККД і коефіцієнта потужності мають такий самий характер, як і для трансформаторів, тобто максимум ККД відповідає навантаженню, що дорівнює 70...85% від номінального. Незнач-

ний максимум має і крива $\cos \varphi = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$.

Робота асинхронного двигуна при малому навантаженні енергетично не вигідна через мале значення коефіцієнта потужності. Максимальний коефіцієнт потужності для асинхронного двигуна:

- малої та середньої потужності (1...100 кВт) — 0,7...0,9;
- великої потужності (понад 100 кВт) — 0,9...0,92.

10.11.4. Обергальний момент на валу входить у співвідношення:

$$P_2 = M_2 \omega_2.$$

Оскільки швидкісна характеристика жорстка, залежність $M_2 = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$ є майже лінійною. Треба пам'ятати, що момент на валу M_2 менший за електромагнітний момент на величину механічних та додаткових втрат.

10.11.5. Струм статора I_1 — це струм, що споживає двигун із мере-

жі. Залежність $I_1 = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$ має майже лінійний характер.

10.12. Двигун із фазним ротором

10.12.1. Частина асинхронних двигунів виконується з фазним ротором. Цей ротор також запропонував М. О. Доливо-Добровольський у 1890 р. У пази пакета ротора укладається така сама трифазна обмотка,

10. Асинхронні машини

як і обмотка статора. Фази (котушки) обмотки з'єднуються звичайно зіркою. Їх кінці приєднуються до трьох контактних кілець. Через кільця і щітки обмотка ротора вмикається на зовнішній трифазний реостат. Таким чином штучно збільшується опір обмотки ротора. На рис. 10.20 наведено схему підключення реостата до двигуна з фазним ротором.

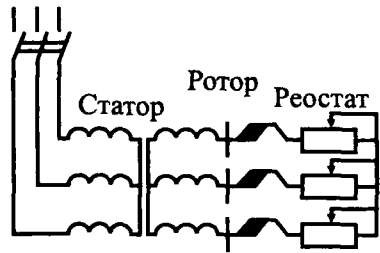


Рис. 10.20

10.12.2. Двигун із фазним ротором має кращі умови пуску. Вираз для електромагнітного моменту має вигляд:

$$M = C\Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

де $\psi_2 = \text{arctg} \frac{X_2}{R_2}$.

Якщо увімкнути трифазний реостат послідовно з обмоткою ротора, то збільшиться опір R_2 , зменшиться ψ_2 і збільшиться $\cos \psi_2$, тобто збільшиться пусковий момент і поліпшаться умови пуску.

Зміна опору ротора (введення реостата) дає змогу змінювати швидкість обертання ротора. На рис. 10.21 показано механічну характеристику двигуна з фазним ротором та її зміну із введенням реостата.

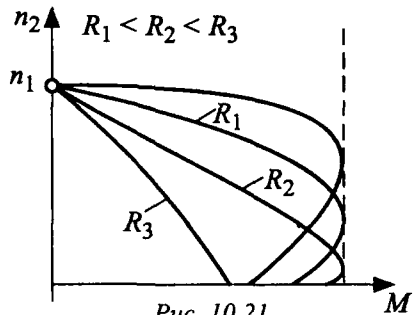


Рис. 10.21

10.12.3. При збільшенні додаткового опору характеристика стає більш м'якою, а пусковий момент зростає. Якщо значно збільшити додатковий опір, то можна одержати лінійну механічну характеристику. При введенні реостата відповідно змінюється і залежність $M = f(s)$, наведена на рис. 10.22. Ці характеристики дуже неекономічні, тому що велика кількість енергії в реостаті перетворюється на тепло.

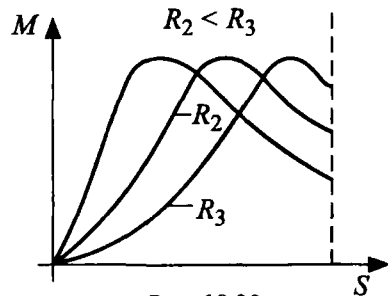


Рис. 10.22

10.13. Регулювання швидкості обертання ротора

10.13.1. З точки зору регулювання швидкості обертання ротора, асинхронний двигун гірший за двигуни постійного струму. Зазвичай асинхронні двигуни застосовуються у нерегульованих приводах.

10.13.2. Двигун із фазним ротором регулюється введенням реостата. При цьому зменшуються оберти n_1 . Це дуже неекономічно, бо збільшуються втрати на додатковому опорі. Регулюючі реостати розраховують на тривалий режим роботи та регулюють оберти у діапазоні до трьох разів.

10.13.3. Згідно із співвідношенням

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

регулювати швидкість обертання ротора короткозамкненого двигуна можна двома способами.

1. *Зміною числа пар полюсів.* Виводи котушок статорної обмотки перемикаються на клемній дошці. В залежності від їх перемикавання змінюється число пар полюсів. Цей спосіб дає змогу регулювати оберти ступінчасто.

2. *Зміною частоти струму живлення.* Частоту регулюють тиристорним перетворювачем частоти у межах

$$f_1 = 20 \dots 60 \text{ Гц.}$$

Недоліком цього способу є необхідність вмикання додаткового приладу та невеликі границі регулювання.

10.13.4. Щодо *реверсування* (зміни напрямку обертання ротора), то необхідно змінити напрям обертання магнітного поля. Це можна здійснити, якщо перемкнути два будь-які лінійні проводи, що з'єднують трифазну мережу із статором двигуна.

10.14. Пуск асинхронного двигуна

10.14.1. У асинхронного двигуна не дуже добрі пускові характеристики. При пускові під повною напругою виникають значні струми в обмотці статора, що у кілька (6...7) разів перевершують номінальні.

10. Асинхронні машини

Це небезпечно і для двигуна, і для мережі змінного струму. Пусковий момент двигуна малий, тому при пускові двигун треба розвантажити. Задачу пуску розв'язують за допомогою *штучного підвищення опору обмотки ротора*. При цьому збільшується пусковий момент та зменшується пусковий струм.

10.14.2. Пуск двигуна з фазним ротором здійснюється введенням максимального опору реостата в обмотці фазного ротора. Після розгону ротора поступово зменшують опір реостата. Інколи використовують ступінчастий реостат (пусковий додатковий та робочий опір).

10.14.3. Пуск короткозамкненого двигуна полегшується спеціальною конструкцією ротора у *двигуні з витісненням струму*. У *роторі з глибоким пазом* стержні “білячої клітки” виготовляються у вигляді пластини і вкладаються у глибокий паз осердя ротора. Розподіл струму за глибиною паза залежить від індуктивності окремих його частин. Потокозчеплення та індуктивність глибинної частини стержня більша за потокозчеплення та індуктивність зовнішніх частин. Тому у момент пуску, коли частота струму у стержнях велика (дорівнює частоті обертового магнітного поля), індуктивний опір глибинних частин великий. Відбувається “витіснення” струму у верхню частину стержня (рис. 10.23). Таким чином, збільшується активний опір “білячого колеса” при пускові, поліпшуються пускові характеристики. У номінальному режимі роботи двигуна частота струму у стержнях мала, процес “витіснення” відсутній, активний опір стержня зменшується.

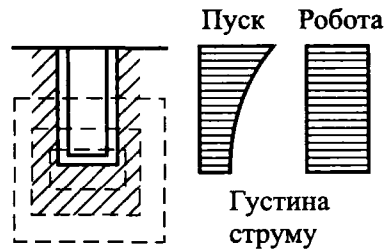


Рис. 10.23

Стержні ротора з глибоким пазом можна виготовляти різної форми (рис. 10.24).

Ротор з подвійною “білячою кліткою” має два “білячих колеса”. Верхня клітка виготовляється з латуні, нижня – з міді й має більший переріз.

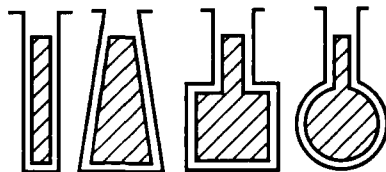


Рис. 10.24

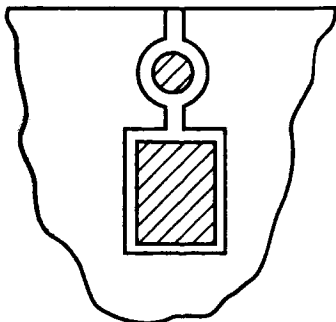


Рис. 10.25

У момент пуску струм витискається у верхню латунну клітку, що має великий активний опір. Ця клітка називається **пусковою**. В усталеному режимі працює нижня, робоча клітка з малим активним опором (рис. 10.25). У двигуна з витісненням струму пусковий момент може збільшуватись у три рази. Пусковий струм встановлюється у три-чотири рази більший за номінальний.

10.14.4. За рахунок зниження напруги, що подається на обмотку статора, є змога зменшити пусковий струм. Зниження пускового струму спричиняє небажане зменшення і пускового моменту. Цей спосіб називається **пуском при зниженій напрузі**. Є кілька способів пуску при зниженій напрузі. Напругу зменшують або за допомогою додаткового приладу, або методом перемикавання обмоток:

- 1) пуск за допомогою реактивної котушки;
- 2) пуск за допомогою реостата (активного опору);
- 3) автотрансформаторний пуск;
- 4) пуск перемиканням котушок обмотки статора з “трикутника” (у номінальному режимі) на “зірку”.

На жаль, усі ці способи знижують не тільки пусковий струм, а й пусковий момент.

10.15. Асинхронний генератор

10.15.1. Асинхронні машини як генератори майже не застосовуються. Як джерело трифазної синусоїдальної ЕРС вони мають великі недоліки порівняно із синхронними генераторами. Частота ЕРС асинхронних генераторів змінна (залежить від навантаження), вони мають низький коефіцієнт потужності та завантажують мережу реактивним струмом. Крім того, напругу асинхронного генератора можна регулювати лише зміною частоти обертання, що також змінює частоту струму.

10.15.2. Ковзання асинхронної машини:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

10. Асинхронні машини

Як і всі електричні машини, асинхронна машина оборотна. Якщо

$$S < 0,$$

то машина працюватиме *в режимі генератора*. *Негативне ковзання* забезпечується, коли ротор обертається швидше, ніж поле ($n_2 > n_1$). Отже, зовнішня сила обертає вал зі швидкістю, більшою за синхронну. Електромагнітна сила (електромагнітний момент) протидіє обертанню ротора. Для забезпечення роботи генератора необхідно передавати ротору потужність від зовнішнього джерела енергії.

Механічна характеристика асинхронного генератора аналогічна характеристиці двигуна (рис. 10.26). Електромагнітний момент має максимум при критичному ковзанні. Треба пам'ятати, що в генераторному режимі він гальмуючий та більший за момент в режимі двигуна на 30... 50%. Це пояснюється більшою ЕРС E_r , тож і більшим значенням магнітного потоку.

10.15.3. Генераторний режим використовують для обмеження швидкості обертання вала. Коли виконавчий механізм прискорює рух, то переведенням двигуна у режим генератора можна відтворити рекуперативне гальмування, тобто роботу з повертанням енергії в мережу.

На транспорті (кораблях, літаках, тепловозах тощо) встановлюють асинхронні генератори, що генерують ЕРС несталої частоти. Ці генератори мають надійну конструкцію і працюють зі швидкісними двигунами з частотою до 12 000 об/хв. Такі енергетичні установки мають добрі масогабаритні характеристики.

При автономній роботі асинхронні генератори споживають індуктивну потужність. Для компенсації паралельно до обмоток статора вмикають конденсатори.

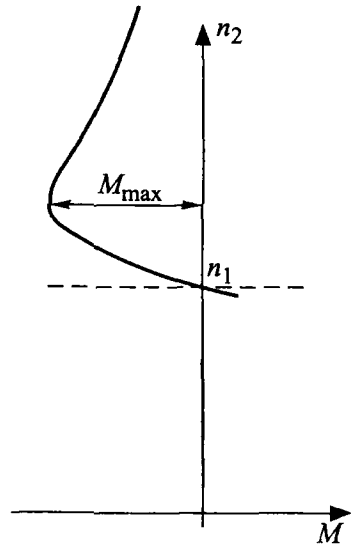


Рис. 10.26

10.16. Електромагнітне гальмо

10.16.1. Якщо під час роботи асинхронного двигуна змінити напрямок обертання поля, то воно буде гальмувати ротор. Цей режим називається *режимом електромагнітного гальма*. При електромагнітному гальмуванні швидкість обертання ротора —

$$n_2 < 0,$$

тобто спрямована проти напрямку обертання поля n_1 . Тому у режимі електромагнітного гальма —

$$S > 1.$$

Для швидкісного гальмування (зупинки) механізму користуються *гальмуванням противмиканням* (або *гальмуванням протиструмом*). При цьому створюються великі гальмівні моменти.

10.16.2. Для відтворення режиму електромагнітного гальма при працюючому двигуні треба:

- перемкнути дві будь-які обмотки статора (при цьому змінюється напрямок обертання поля);
- увімкнути в коло ротора додатковий опір.

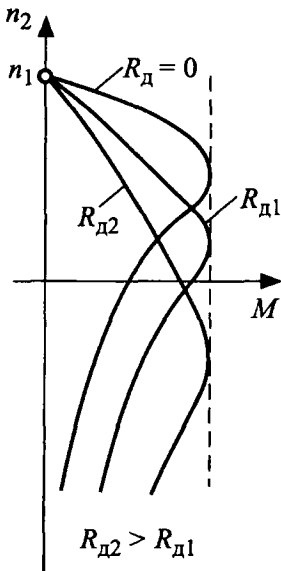


Рис. 10.27

На рис. 10.27 наведено механічну характеристику асинхронної машини в режимі електромагнітного гальма (ділянка неактивних n_2). Введення додаткового опору в колі ротора

- обмежує струм машини;
- підвищує стійкість роботи;
- зсуває максимум моменту в ділянку електромагнітного гальмування ($S < 1$);
- дає змогу регулювати гальмівний момент.

10.16.3. Для гальмування асинхронної машини застосовують також *режим динамічного гальмування*. Він полягає у такому:

- статор асинхронної машини вимикають від мережі змінного струму;
- дві або усі три фази обмотки статора вмикають на постійну напругу;

10. Асинхронні машини

— на обмотку ротора вмикається активний опір.

При цьому статор індукує постійний потік, а ЕРС ротора гаситься на активному опорі.

10.17. Однофазні асинхронні двигуни

10.17.1. У системах керування, автоматиці, промисловості використовують однофазні та двофазні асинхронні двигуни малої потужності. Якщо на статорі двигуна розташувати однофазну обмотку, то змінний струм буде індукувати пульсуючий магнітний потік. У обмотці ротора будуть індукуватися струми та створяться сили, протилежно спрямовані з обох боків ротора. Тобто електромагнітний момент дорівнюватиме нулеві. Зазвичай пульсуюче поле розглядають як суму двох обертових у протилежні боки полів (рис. 10.28), тобто *механічна характеристика однофазного двигуна не має пускового моменту*. Двигун буде працювати, якщо роторові надати початкове обертання в той чи інший бік.

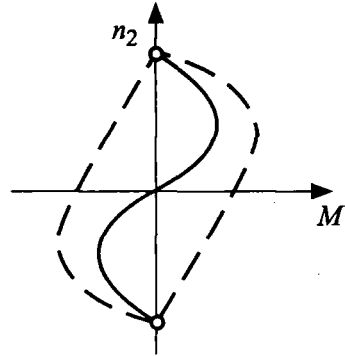


Рис. 10.28

10.17.2. Щодо пуску асинхронного двигуна, то на статорі передбачають *пускову обмотку*, вісь якої перпендикулярна до осі робочої обмотки. Пускова обмотка вмикається через конденсатор або активний опір, що забезпечує зсув фази струму відносно до струму у робочій обмотці (рис. 10.29). Пускова обмотка дає змогу розбалансувати сили, що виникають у роторі під впливом робочої обмотки, і створити пусковий момент. Після розгону ротора пускова обмотка вмикається, бо вона не розрахована на тривалий струм.

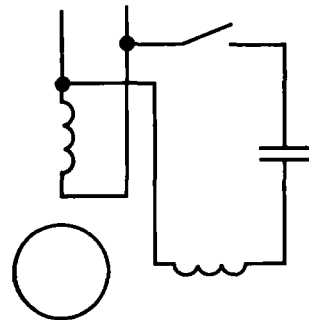


Рис. 10.29

10.17.3. Використовують також й однофазний асинхронний *двигун із розчленованими*

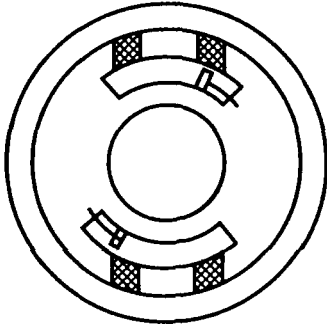


Рис. 10.30

полюсами. На рис. 10.30 схематично зображено двигун, у якого статор має явно виявлені полюси з однофазною обмоткою. Частина кожного полюса охоплена короткозамкненим витком. У цьому виткові індукуються струм, котрий, у свою чергу, індукує магнітний потік. Потік короткозамкненого витка зсунутий за фазою відносно основного потоку. Додавання цих потоків дає змогу одержати обертове коло.

Ротор двигуна з розчленованими полюсами може обертатися тільки в один бік.

10.17.4. Однофазні асинхронні двигуни мають значно менші ККД та $\cos\phi$, ніж трифазні. Вони використовуються тільки у випадках, коли споживається порівняно невелика потужність.

10.18. Двофазні асинхронні двигуни

10.18.1. Обертове магнітне поле можна створити вмиканням двофазної обмотки. В одну з фаз умикають конденсатор, тому ці двигуни також називають конденсаторними. Параметри котушок та ємності забезпечують рівні магніторушійні сили. Струм у фазі з конденсатором випереджає струм іншої фази на чверть періоду.

Тому обертове магнітне поле буде також і круговим.

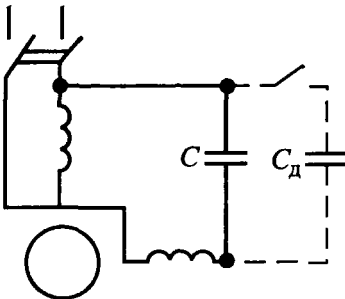


Рис. 10.31

10.18.2. При навантаженні, що відрізняється від номінального, пусковий момент може бути недостатнім. Тому для пуску двигуна використовують додатковий (пусковий) конденсатор. Після розгону ротора цей конденсатор вимикається для забезпечення максимального ККД та $\cos\phi$ у номінальному режимі (рис. 10.31).

10.18.3. Трифазний двигун можна вмикати у мережу однофазного змінного

10. Асинхронні машини

струму, використовуючи його як двофазний. У цьому разі дві котушки статора працюють як одна фаза, а третя котушка з конденсатором — як друга фаза (рис. 10.32).

10.19. Фазообертач

10.19.1. Фазообертач (або фазорегулятор) являє собою *загальмовану трифазну асинхронну машину з фазним ротором*. На статор подається трифазна синусоїдна напруга, а з фазного ротора подається навантаження (рис. 10.33). Зміна взаємного розташування статора і фазного ротора не впливає на діюче значення вторинної напруги, тому що обертове магнітне поле статора стало. Але зсув фази ЕРС ротора залежить від взаємного розташування обмоток статора і ротора.

Для поступової зміни положення ротора відносно статора використовують черв'ячну передачу з ручним або електричним приводом.

10.19.2. Фазообертачі застосовуються у пристроях автоматики, для керування вентиляльними перетворювачами, для перевірки лічильників та ватметрів тощо.

Промислові фазорегулятори випускають на напругу 127...380 В і струм мережі до 100 А. Вони дають змогу регулювати фазу в межах 0...360°.

10.20. Асинхронний перетворювач частоти

10.20.1. Асинхронна машина з фазним ротором може працювати перетворювачем частоти змінної напруги.

Статор машини вмикається на мережу трифазного струму з частотою f_1 . Привідний двигун (синхронний або асинхронний)

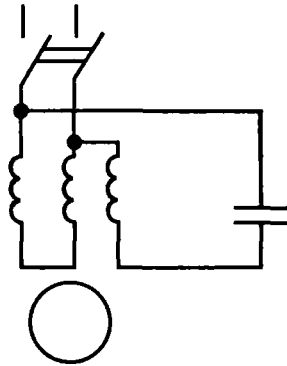


Рис. 10.32

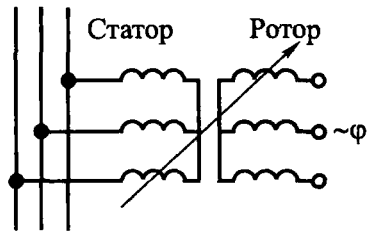


Рис. 10.33

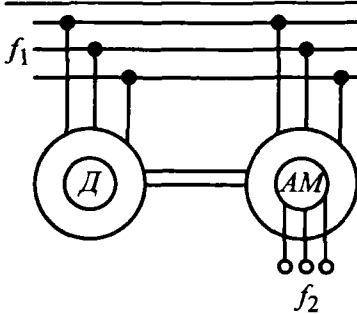


Рис. 10.34

обертає фазний ротор зі швидкістю n_2 (рис. 10.34). Обмотка фазного ротора машини АМ індукує ЕРС, частота котрої —

$$f_2 = S f_1 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Регулювання частоти відтворюється зміною частоти обертання ротора двигуна Д.

10.20.2. Щоб отримати частоту $f_2 > f_1$, треба обертати ротор проти напрямку обертання поля. При цьому перетворювач частоти АМ працює у режимі електромагнітного гальма, а двигун Д передає йому потужність.

Щоб отримати частоту $f_2 < f_1$, перетворювач має працювати у режимі двигуна. Ротор обертається в напрямку поля, а двигун Д працює у режимі генератора й споживає потужність від перетворювача.

Щоб забезпечити поступове регулювання частоти f_2 , необхідно регулювати частоту обертання ротора. Для цього зручно застосовувати двигун постійного струму.

10.21. Індукційний регулятор

10.21.1. *Загальмована асинхронна машина* може працювати автотрансформатором із регульованим коефіцієнтом трансформації. Обмотки статора і ротора з'єднуються послідовно, і на затискачі

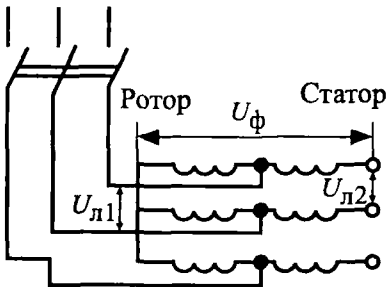


Рис. 10.35

ротора подається трифазна напруга. Така машина називається індукційним регулятором (рис. 10.35). Обмотка ротора використовується як первинна обмотка автотрансформатора. Коефіцієнт трансформації залежить від кута обертання ротора. Межі регулювання індукційним регулятором:

$$U_{л2} = (0 \dots 2) U_{л1}.$$

10. Асинхронні машини

10.21.2. Особливістю індукційного регулятора є можливість регулювання без комутаційних приладів. У потужних регуляторах виникає значний електромагнітний момент. Щоб розвантажити ротор та поліпшити керування положенням ротора, виготовляють регулятори у вигляді двох машин на одному валу. У цих машинах обертальні моменти протилежні.

10.21.3. Промисловість випускає індукційні регулятори напруги на потужність навантаження до 2000 кВ А і на напругу трифазної мережі до 10 000 В.

11. СИНХРОННІ МАШИНИ

11.1. Будова та принцип роботи синхронної машини

11.1.1. Як і усі електричні машини, синхронна машина обернена і може широко використовуватися у промисловості як генератори та двигуни переважно великої потужності. Синхронні машини належать до класу машин змінного струму. Частота обертання ротора синхронної машини дорівнює частоті обертового магнітного поля, тобто $n_1 = n_2$, $S = 0$.

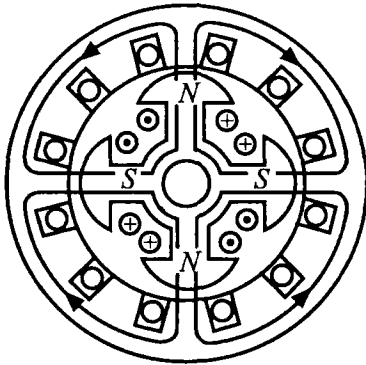


Рис. 11.1

11.1.2. Синхронна машина складається із статора і ротора (рис. 11.1). Конструкція статора принципово не відрізняється від конструкції статора асинхронного двигуна. Тобто у шихтованому осердді розташована трифазна обмотка статора. Ротор синхронної машини являє собою електромагніт, обмотка якого живиться від джерела постійного струму. Ротор синхронної машини буває двох типів:

- явнополюсний;
- неявнополюсний.

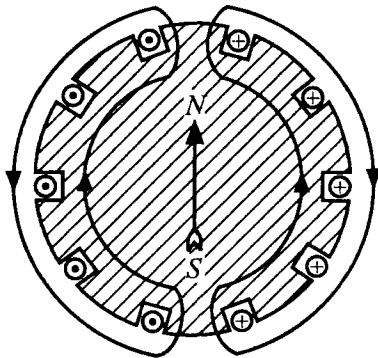


Рис. 11.2

Явнополюсний ротор (рис. 11.1) використовується здебільшого у тихохідних синхронних машинах. Обмотка ротора приєднується до контактних кілець, і за допомогою щіток на неї подається постійна напруга. У машинах із великою швидкістю обертання (турбогенераторах, газогенераторах) застосовується неявнополюсний ротор. На рис. 11.2 наведено схему неявнополюсного ротора з однією парою полюсів. У багатополюсних роторах полюси чергуються по колу.

11. Синхронні машини

Обмотка ротора збуджує постійний магнітний потік і називається обмоткою збудження.

11.1.3. У *генераторному режимі* обмотка збудження вмикається на постійну напругу. Магнітне поле ротора обертається разом із ротором і перетинає трифазну обмотку статора. У фазах індукується ЕРС

$$E = 4,44 f w k \Phi_m,$$

де w — число витків;

k — обмотковий коефіцієнт.

Частота індукованої ЕРС:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

11.1.4. У *режимі двигуна*, крім постійної напруги, що подається на обмотку збудження, подається також трифазна синусоїдна напруга на обмотку статора. Обмотка збуджує обертове магнітне поле, яке захоплює у синхронному обертанні поле ротора й сам ротор. Тобто ротор обертається з частотою обертання магнітного поля (синхронною частотою):

$$n = \frac{60 f}{p}.$$

11.2. Холостий хід синхронного генератора

11.2.1. Холостий хід (або неробочий режим) утворюється при вимкненому навантаженні. Струм статора у цьому разі дорівнює нулеві. Струм збудження регулюється зовнішнім джерелом у широких межах. Характеристика неробочого (холостого) ходу (рис. 11.3) являє собою магнітну характеристику системи і нагадує криву намагнічування.

11.2.2. Щодо форми ЕРС статорної обмотки, то вона залежить від форми магнітного потоку по колу статора. Спеціальною формою полюсних наконечників можна одержати синусоїдну ЕРС статорної обмотки.

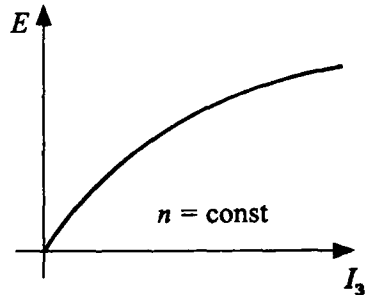


Рис. 11.3

11.3. Реакція якоря синхронної машини

11.3.1. Та частина електричної машини, що індукує ЕРС, називається якорем. Тому у синхронній машині *якорем називається статор машини. Індуктором будемо називати ротор* синхронної машини. *Реакцією якоря називається взаємодія полів статора та ротора.*

11.3.2. У синхронному генераторі струм якоря (статора) збуджує своє магнітне поле, що залежить від навантаження. Від виду навантаження залежить зсув фаз між струмом та ЕРС якоря. Треба вважати, що:

- потік якоря завжди збігається з напрямом його струму;
- ЕРС якоря завжди відстає від потоку на 90° ;
- зсув фаз між ЕРС та струмом якоря залежить від виду навантаження.

Тому при активному навантаженні ЕРС і струм якоря збігаються за фазою, тобто потік якоря відстає від потоку збудження на 90° (рис. 11.4). У цьому разі маємо *поперечну реакцію якоря*. За індуктивним навантаженням струм якоря відстає від ЕРС на 90° . Якщо ЕРС

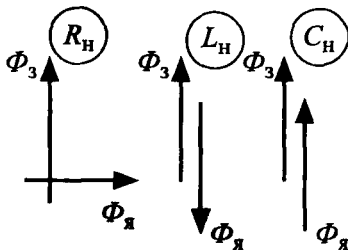


Рис. 11.4

відстає на 90° від потоку збудження, то потік якоря спрямований назустріч потоку збудження. *За індуктивним навантаженням у результаті реакції якоря слабшає потік збудження.* За ємнісним навантаженням потоки спрямовані в один бік. Тобто *за ємнісним навантаженням у результаті реакції якоря підсилюється потік збудження.*

11.3.3. Таким чином, реакція якоря може:

- бути поперечною (активне навантаження);
- послаблювати поле (індуктивне навантаження);
- підсилувати поле (ємнісне навантаження).

11.4. Електромагнітний момент та кутова характеристика машини

11.4.1. Потужність, що передається від індуктора машини до однієї фази якоря, називається *електромагнітною потужністю*.

1.1. Синхронні машини

Як і в теорії асинхронних машин, ця потужність:

$$P_{\text{см}} = M\omega,$$

де M — електромагнітний момент синхронної машини.

Електромагнітна потужність відрізняється від активної потужності машини на величину втрат в обмотці якоря. В машинах середньої та великої потужності втрати в обмотці якоря, порівняно з активною потужністю, незначні. Тобто можна вважати, що

$$P_{\text{см}} = P = mUI \cos \varphi,$$

де P — активна потужність машини;

m — кількість фаз у обмотці якоря.

У такому разі можна визначити електромагнітний момент синхронної машини таким чином:

$$M = \frac{mUI \cos \varphi}{\omega}.$$

11.4.2. Якщо машина працює *генератором*, то електромагнітний момент *проти*діє обертанню ротора, тобто є *гальмівним*.

Поле якоря обертається синхронно з ротором. Але між осями полюсів поля якоря та індуктора є деяке кутове зміщення. Цей кут називається *кутом непогодження*, або *кутом навантаження*. Можна довести, що

$$M = M_{\text{max}} \sin \theta,$$

де M_{max} — амплітуда моменту;

θ — кут непогодження.

11.4.3. Залежність $M = f(\theta)$ називають *кутовою характеристикою машини*.

Звичайно це синусоїда (рис. 11.5), на котрій при

$0 < \theta < \pi$, $M > 0$ — режим двигуна;

$0 > \theta > -\pi$, $M < 0$ — режим генератора.

Стійкий режим роботи генератора відповідає куту непогодження:

$$-\frac{\pi}{2} < \theta < 0,$$

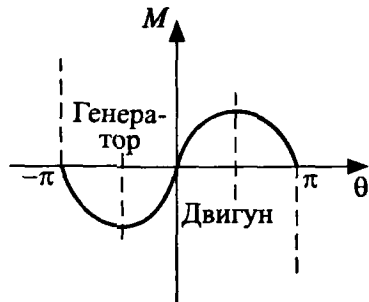


Рис. 11.5

а для двигуна – $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$.

11.5. Векторна діаграма синхронного генератора

11.5.1. Крім потоку якоря, струм якоря створює також невеликий потік розсіяння, що замикається навколо обмотки статора і не входить у ротор. Таким чином, у статорі індуються три ЕРС:

\dot{E} — від потоку збудження $\dot{\Phi}_z$;

$\dot{E}_я$ — від потоку якоря $\dot{\Phi}_я$;

$\dot{E}_р$ — від потоку розсіяння $\dot{\Phi}_р$.

ЕРС можна визначити так:

$$\dot{E}_я = -j\dot{I}_я X_я;$$

$$\dot{E}_р = -j\dot{I}_я X_р,$$

де $X_я$ — індуктивний опір якоря,

$X_р$ — індуктивний опір розсіяння,

$$X_c = X_я + X_р,$$

де X_c — синхронний опір.

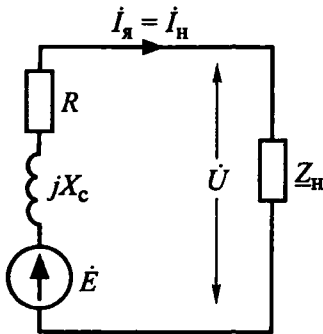


Рис. 11.6

11.5.2. Схему заміщення якоря синхронної машини наведено на рис. 11.6. За другим законом Кірхгофа можна записати:

$$\dot{E} + \dot{E}_я + \dot{E}_р = \dot{I}_я R + \dot{I}_я Z_H,$$

де $\dot{I}_я Z_H = \dot{U}$.

Тому рівняння щодо напруги на затискачах синхронного генератора таке:

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_я X_c - \dot{I}_я R.$$

Це основне рівняння синхронного генератора.

11.5.3. Векторна діаграма синхронного генератора будується за основним рівнянням генератора в залежності від вигляду навантаження. Порядок побудови векторної діаграми може бути такий:

11. Синхронні машини

- довільно будується вектор \dot{E} ;
- за видом навантаження відкладається кут ψ і будується вектор $\dot{I}_я$ (на рис. 11.7 наведено діаграму щодо активно-індуктивного навантаження);
- за основним рівнянням визначається вектор напруги.

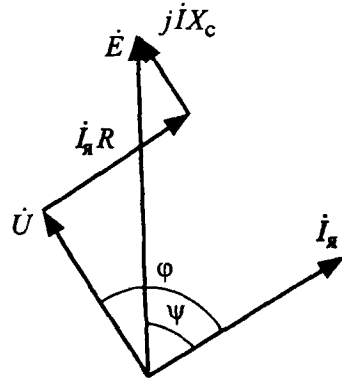


Рис. 11.7

11.6. Характеристики синхронних генераторів

11.6.1. *Характеристика неробочого (холостого) ходу* вже розглядалась (рис. 11.3). Вона не залежить від реакції якоря, тому що будується при вимкненому навантаженні.

11.6.2. *Зовнішня характеристика* генератора — це залежність напруги на навантаженні від струму якоря —

$$U = f(I_я),$$

коли $n = \text{const}$, $I_в = \text{const}$. Зовнішня характеристика залежить від виду навантаження (рис. 11.8).

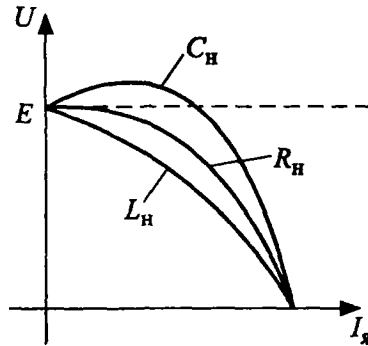


Рис. 11.8

11.6.3. Реакція якоря впливає також і на вигляд *регульовальної характеристики* (рис. 11.9). Регульовальна характеристика — це залежність струму збудження від струму якоря при сталій напрузі на навантаженні, тобто:

$$I_з = f(I_я)$$

при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$.

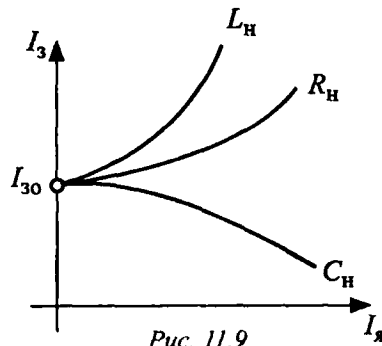


Рис. 11.9

11.7. U -подібна характеристика синхронного генератора

11.7.1. Якщо зовнішній момент на валу синхронного генератора не змінюється, то сталою залишається і активна потужність;

$$M = \frac{mUI \cos \varphi}{\omega}$$

Отже, якщо змінювати струм збудження, то при сталій потужності змінюються струм якоря та $\cos \varphi$, тобто струмом збудження можна регулювати коефіцієнт потужності.

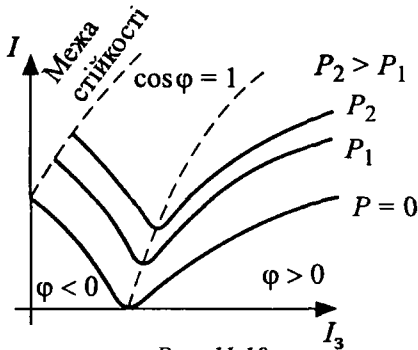


Рис. 11.10

Залежність струму якоря від струму збудження при сталій активній потужності генератора називається *U-подібною характеристикою*. На рис. 11.10 наведено *U-подібні характеристики* генератора з різною потужністю. Звичайно мінімальний струм встановлюється при $\cos \varphi = 1$.

При негативних значеннях φ струм якоря обмежується ділянкою нестійкої роботи генератора $\left(\theta < -\frac{\pi}{2} \right)$. При позитивних значеннях φ струм якоря обмежується звичайно магнітним насиченням осердя.

11.8. Паралельна робота синхронних генераторів

11.8.1. Зазвичай синхронні генератори використовують як основне джерело енергії, тому вони не працюють автономно. Кілька генераторів умикають на паралельну роботу у системах електропостачання. На сучасних літаках у паралельну роботу вмикають від двох до п'яти генераторів.

11.8.2. Для увімкнення синхронних генераторів на паралельну роботу треба виконати три умови:

— ЕРС синхронних генераторів повинна дорівнювати напрузі мережі;

1. Синхронні машини

- частота ЕРС генератора має дорівнювати частоті струму мережі;
- ЕРС генератора та напруга мережі повинні збігатися за фазою.

При цьому чергування фаз генератора повинно збігатися з чергуванням фаз у мережі.

11.8.3. *Три умови* увімкнення генераторів у паралельну роботу виконують таким чином:

- ЕРС генератора змінюють за допомогою струму збудження;
- частоту генератора змінюють регулюванням обертів привідного двигуна;
- зміну фази ЕРС здійснюють зміною швидкості обертання у межах одного оберту. Після увімкнення генератора у мережу швидкість обертання ротора підтримується сталою відповідно до частоти струму у мережі.

11.9. Безконтактні синхронні генератори

11.9.1. У звичайних синхронних генераторах обмотка збудження (ротора) за допомогою контактних кілець та щіток вмикається на постійну напругу. Це має ряд недоліків:

- вимагає додаткового автономного джерела постійного струму;
- щітковий вузол потребує спеціального догляду, зменшує ефективність машини.

Використовують безконтактні синхронні генератори двох типів.

11.9.2. У синхронного *генератора з постійними магнітами* немає обмотки збудження на роторі (рис. 11.11). Постійні магніти на роторі скасовують необхідність обмотки збудження, а також контактних кілець, щіток та джерела постійної напруги. ККД таких генераторів досить високий, тому що відсутні втрати в обмотці збудження. Значним недоліком цього генератора є *відсутність прямого методу регулювання ЕРС*, тому що зазвичай ЕРС регулюється струмом збудження. У синхронних генераторах із постійними магнітами застосовується побічний метод регулювання ЕРС. В осердя

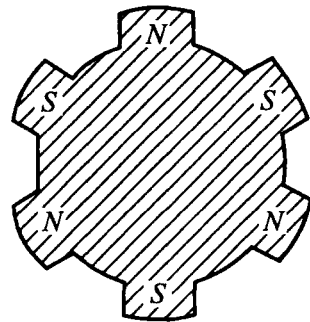


Рис. 11.11

статора вкладається додаткова обмотка підмагнічування, що живиться постійним струмом. Чим більший струм підмагнічування, тим менша магнітна проникність осердя, більший магнітний опір — менший потік та ЕРС генератора.

11.9.3. У синхронних генераторах з обертовим випрямлячем живлення обмотки збудження здійснюється від додаткового генератора, змонтованого на одному валу з основним. Цей додатковий генератор створюється за оберненою схемою, тобто статорна обмотка є обмоткою збудження. У роторній обмотці індукується ЕРС. На валу змонтований випрямляч, що перетворює змінну ЕРС у постійну напругу для живлення обмотки збудження генератора.

11.10. Характеристики синхронних двигунів

11.10.1. Основною перевагою синхронного двигуна перед двигунами інших типів є *абсолютно жорстка механічна характеристика*

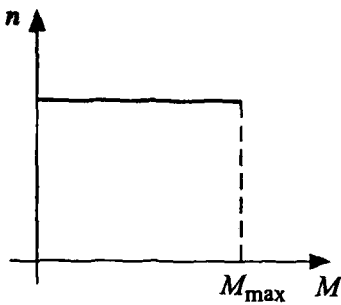


Рис. 11.12

(рис. 11.12). Тобто ротор обертається зі швидкістю обертового магнітного поля, що збуджується статором. Швидкість обертання поля не залежить від моменту опору. Якщо опір більший за максимальний, ротор зупиняється.

11.10.2. Полюси статора і ротора обертаються з однаковою швидкістю. Але між осями цих полюсів є деяке кутове зміщення. Це зміщення залежить від моменту опору. Залежність електромагнітного моменту від кута між осями полюсів статора і ротора називається *кутовою характеристикою двигуна* (рис. 11.13). Момент має позитивні значення у межах:

$$0 < \theta < \pi,$$

але стійкий режим роботи може бути тільки на ділянці

$$0 < \theta < \pi/2.$$

Звичайно $\theta_{\text{ном}} = (20 \dots 30)^\circ$.

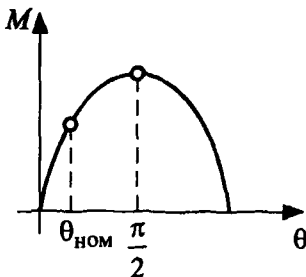


Рис. 11.13

1. Синхронні машини

11.10.3. Синхронні двигуни використовують там, де потрібна стабільна швидкість обертання, економічність. Безконтактні мікродвигуни з однофазною та трифазною обмотками статора застосовують у програмних механізмах, електрогодинниках, звуковій апаратурі тощо.

11.10.4. *U-подібною характеристикою синхронного двигуна* називається залежність струму якоря від струму збудження при сталому гальмівному моменті. Як і у генератора, мінімальний струм забезпечується при коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 1$ (рис. 11.14).

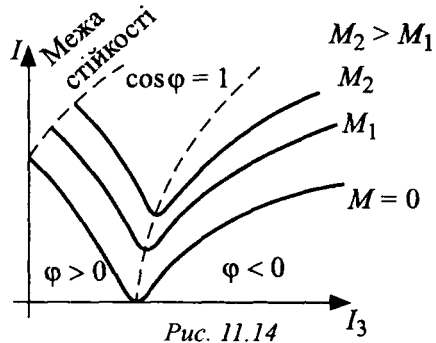


Рис. 11.14

При $\varphi > 0$ струм обмежується ділянкою нестійкої роботи двигуна ($\theta > \pi/2$), а при $\varphi < 0$ — магнітним насиченням осердя.

11.11. Пуск синхронного двигуна

11.11.1. При вмиканні двигуна механічна інерція ротора велика, і обертальний момент на валу практично дорівнює нулеві. Тому для пуску треба розкрутити вал двигуна до швидкості, близької до синхронної. Складний пуск значною мірою обмежує використання синхронного двигуна.

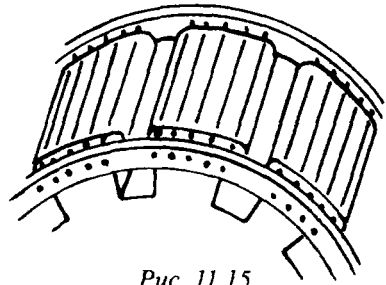


Рис. 11.15

11.11.2. Для пуску синхронного двигуна укладають короткозамкнену обмотку ("біляче колесо") у полюсах ротора (рис. 11.15). Стержні обмотки з'єднуються кільцями. При пусковій обмотка збудження замикається на пусковий опір, як наведено на рис. 11.16. Після увімкнення обмотки статора в мережу створюється обертове магнітне поле,

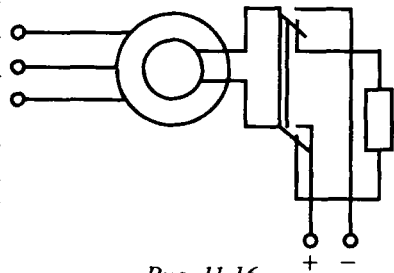


Рис. 11.16

що індукуює струм у “білячому колесі” й утворює асинхронний пусковий момент. Щоб збільшити пусковий момент, іноді використовують клітку з глибоким пазом або подвійну “білячу клітку”. Це підвищує пусковий момент до $0,8 \dots 1,0 M_{II}$. Коли ковзання сягне приблизно до 5%, обмотка збудження вимикається від опору та вмикається на джерело постійного струму. Якщо обмотку збудження на час пуску залишити розімкненою, то велика ЕРС, що індукуюється у ній, призведе до пробивання ізоляції. Після асинхронного розгону ротора та вмикання обмотки збудження виникає синхронний обертальний момент. Дія цього моменту переводить двигун у режим синхронної роботи. Потужні синхронні двигуни пускають при зниженій напрузі на статорній обмотці.

11.12. Синхронні компенсатори

11.12.1. *Синхронний компенсатор* являє собою синхронний двигун, що працює без навантаження на валу. При цьому активний струм обмотки якоря відчутний і машина може працювати при:

$$\cos\varphi = 1,$$

$$\varphi > 0 \text{ (недозбудження),}$$

$$\varphi < 0 \text{ (перезбудження).}$$

Синхронний компенсатор може виконувати такі функції:

- підвищувати коефіцієнт потужності;
- стабілізувати напругу мережі.

11.12.2. Струмом збудження регулюють коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$). При оптимальному струмові $\cos\varphi = 1$. При індуктивному навантаженні мережі збільшують струм збудження (перезбуджують машину), і компенсатор генерує у мережу ємнісний (випереджувальний) струм. При ємнісному навантаженні мережі недозбуджують машину. При цьому у мережу генерується індуктивний (відстаючий) струм. В обох випадках підвищується коефіцієнт потужності.

11.12.3. Для стабілізації напруги струм збудження підтримують сталим, він забезпечує ЕРС компенсатора, що дорівнює напрузі мережі. Якщо напруга мережі зменшиться, то компенсатор споживає реактивний випереджувальний струм. При підвищенні напруги компенсатор завантажує мережу реактивним відстаючим струмом. При великій потужності компенсатора це дає змогу стабілізувати напругу мережі у межах до 1,0%.

11. Синхронні машини

11.13. Втрати та ККД синхронної машини

11.13.1. Втрати у синхронній машині поділяють на

- постійні;
- змінні (що залежать від навантаження).

11.13.2. До постійних втрат, що не залежать від струму якоря, належать:

- втрати в обмотці збудження;
- втрати у сталі (в осерді статора);
- втрати механічні.

До змінних втрат належать:

- втрати у міді;
- додаткові втрати.

Додаткові втрати обумовлені зубцевими коливаннями магнітного потоку, вихровими струмами, що індукуються у різних частинах машини тощо.

11.13.3. ККД синхронної машини визначають:

$$\text{— щодо генератора } \eta = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi + \sum P};$$

$$\text{— щодо двигуна } \eta = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi - \sum P}{\sqrt{3}UI \cos \varphi},$$

де $\sum P$ — сума усіх втрат потужності,
 I та U — діючі значення лінійних струму та напруги.

11.13.4. Оскільки змінні втрати залежать від навантаження, від нього ж залежить й крива ККД (рис. 11.17). Максимуму ККД відповідає навантаження, дещо менше, ніж номінальне. Звичайно ККД синхронних машин середньої потужності складає 88...95%; великої потужності — 96...99%.

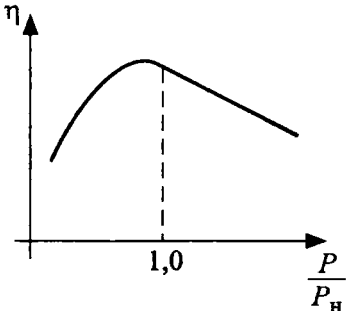


Рис. 11.17

11.14. Переваги та недоліки синхронної машини

11.14.1. Своєрідність синхронних машин визначає їх переваги і недоліки в порівнянні з машинами інших класів. *Переваги* синхронних машин такі:

- високі ККД та коефіцієнт потужності;
- абсолютно жорстка механічна характеристика синхронного двигуна;
- незалежність частоти ЕРС від навантаження машини.

11.14.2. Проте синхронні машини також мають і *недоліки*, що інколи обмежують їх використання:

- складну будову;
- необхідність для двигуна двох джерел напруги (змінної трифазної та постійної);
- утруднення з пуском синхронного двигуна.

11.15. Графічні позначення синхронних машин

11.15.1. Стандартом установлені спрощений та розгорнутий способи позначення синхронних машин (рис. 11.18). У спрощених позначеннях обмотки статора і ротора зображаються у вигляді кола із зазначенням виводів.

У розгорнутих позначеннях обмотку статора зображають ланцюжком півкіл, а обмотку ротора — колом (рис. 11.19). Явнополюсний ротор позначають пунктирним колом. Позначками Δ та Y указують спосіб з'єднання статорної обмотки (рис. 11.18, 11.20).

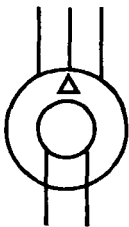


Рис. 11.18

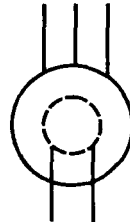
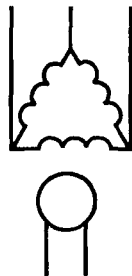
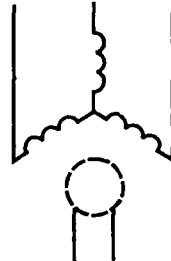


Рис. 11.19



1 1. Синхронні машини

На рис. 11.20 наведено графічне позначення трифазної синхронної машини з обертовим випрямлячем. Котушки обмотки статора цієї машини з'єднано зіркою.

На рис. 11.21 наведено графічне позначення синхронної машини, що збуджується постійними магнітами. Обмотка статора цієї машини з'єднана зіркою з нейтральним проводом.

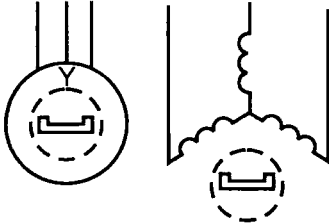


Рис. 11.20

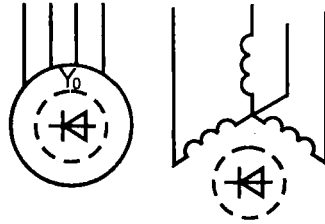


Рис. 11.21

12. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

12.1. Будова та принцип роботи

12.1.1. Машини постійного струму широко використовуються як двигуни і як генератори. Двигуни постійного струму мають значні переваги перед двигунами інших типів:

- допускають поступове регулювання швидкості обертання вала різними способами;
- створюють великий пусковий момент.

У генераторах постійного струму є можливість плавно регулювати ЕРС у широких межах.

12.1.2. *Генератор* перетворює механічну енергію на електричну. Індукована ЕРС долає падіння напруги в обмотці якоря та опори навантаження, тобто:

$$E = U + I \sum R_{\text{я}},$$

де $\sum R_{\text{я}}$ — сумарний опір кола якоря.

Це — *основне рівняння генератора*.

Двигун перетворює електричну енергію на механічну. ЕРС якоря протидіє зовнішній напрузі, що переборює у цьому разі і падіння напруги в обмотці якоря. Тобто *основне рівняння двигуна* має вигляд:

$$U = E + I \sum R_{\text{я}}.$$

12.1.3. Якщо обернути рамку у магнітному полі, то індукована ЕРС визначається *за законом електромагнітної індукції*:

$$E = Blv.$$

Якщо у рамці протікає струм, і рамка знаходиться у магнітному полі, то *за законом електромагнітної сили*:

$$F = BIl.$$

На цих положеннях ґрунтується робота генератора та двигуна постійного струму.

12. Машини постійного струму

12.1.4. Машина постійного струму складається із статора і якоря (рис. 12.1). Нерухома частина називається статором, обертова частина — якорем. Взагалі якорем називається частина машини, в обмотці котрої індукується ЕРС. Статор являє собою станину, всередині котрої встановлені полюси.

Осердя полюса набирається з листів електротехнічної сталі. Обмотка полюсів називається обмоткою збудження. Вона вмикається в такий спосіб, що полюси чергуються по колу ($N-S-N-S$ тощо). Статор створює основний магнітний потік. *Геометрична нейтраль* поділяє простір між полюсами і є лінією нульової індукції. *Осердя якоря* набирається з кілець електротехнічної сталі. У пази осердя вкладається *обмотка якоря*. Окремі *секції* обмотки якоря з'єднуються з пластинами *колектора*. З рис. 12.2, на якому наведено переріз колектора, видно, що кожна його пластина ізолювана. За допомогою щіток на пластини колектора подається напруга, якщо машина працює двигуном. Якщо машина працює генератором, із щіток знімається постійна напруга.

12.1.5. Частина обмотки, що міститься між двома пластинами колектора, називається секцією. Число секцій та число колекторних пластин однакове. Обмотка якоря буває двох типів:

- петльова (рис. 12.3);
- хвильова (рис. 12.4).

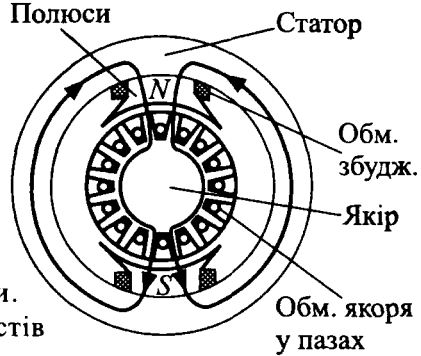


Рис. 12.1

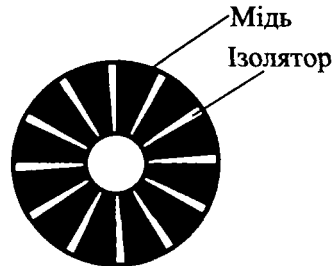


Рис. 12.2

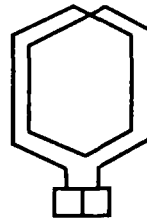


Рис. 12.3

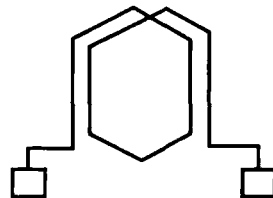


Рис. 12.4

Петльова обмотка звичайно використовується у машинах великої потужності, а хвильова — у машинах середньої та невеликої потужності (до 500 кВт, 110–380 В).

12.2. Електрорушійна сила

12.2.1. Якщо у магнітному полі рухається провідник із швидкістю v , то, за законом електромагнітної індукції, в ньому індукується ЕРС:

$$e_{\text{пр}} = Blv.$$

12.2.2. Щоб визначити ЕРС якірної обмотки, треба врахувати з'єднання провідників у обмотку, тобто:

$$E_{\text{я}} = e_{\text{пр}} \frac{N}{2a} = Blv \frac{N}{2a},$$

де N — кількість провідників у обмотці;

$2a$ — число паралельних віток;

$\frac{N}{2a}$ — число провідників, що увімкнуті послідовно.

12.2.3. Якщо врахувати лінійну швидкість $\left(v = \frac{\pi D n}{60} \right)$, полюсну поділку $\left(\tau = \frac{\pi D}{2p} \right)$, магнітний потік $(\Phi = Bl\tau)$, то ЕРС можна визначити за формулою:

$$E = \Phi \frac{N n \tau 2p}{\tau 2a 60} = \frac{pN}{60a} \Phi n.$$

12.2.4. Величина

$$C_e = \frac{pN}{60a}$$

залежить тільки від конструкції машини (числа пар полюсів, числа провідників та особливостей з'єднання обмотки). Ця величина C_e називається *сталюю машини* і входить коефіцієнтом до формули ЕРС якірної обмотки.

12.2.5. ЕРС якірної обмотки залежить від:

— *основного магнітного потоку*;

— *числа обертів якоря*, тобто:

$$E_{\text{я}} = C_e \Phi n.$$

12. Машина постійного струму

12.3. Електромагнітний момент

12.3.1. Відповідно до закону електромагнітної сили на провідник зі струмом у магнітному колі діє сила —

$$F_{\text{пр}} = BI_{\text{пр}}l,$$

де $I_{\text{пр}}$ — сила струму у провіднику.

12.3.2. Щоб визначити електромагнітний (обертальний) момент, необхідно цю силу помножити на плече ($D/2$) і врахувати кількість провідників, тобто:

$$M = F_{\text{пр}}N \frac{D}{2}.$$

12.3.3. Якщо врахувати струм якоря ($I_{\text{я}} = 2aI_{\text{пр}}$, $2a$ — число паралельних провідників у обмотці якоря), полюсну поділку $\left(\tau = \frac{\pi D}{2p} \right)$, магнітний потік ($\Phi = B\tau$), обертальний момент можна визначити таким чином:

$$M = \frac{pN}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi.$$

12.3.4. Величина

$$C_{\text{м}} = \frac{pN}{2\pi a}$$

залежить тільки від особливостей конструкції машини і називається *сталюю машиною*. Вона входить у формулу електромагнітного моменту:

$$M = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}.$$

Тобто момент машини залежить *від сили струму якоря та основного магнітного потоку*.

12.4. Реакція якоря

12.4.1. Якщо генератор постійного струму вимкнено від навантаження, то у колі якоря відсутній струм. Але якщо вмикається навантаження, то в обмотці якоря протікає струм, тобто обмотка збуджує

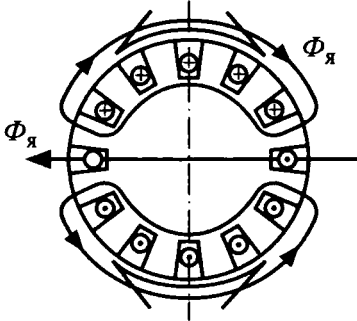


Рис. 12.5

12.4.3. Реакція якоря спотворює основний магнітний потік. З одного боку полюса магнітний потік підсилюється, а з другого — послаблюється (рис. 12.6). Реакція якоря зміщує лінію нульових індукцій. На геометричній нейтралі встановлюється індукція, відмінна від нуля.

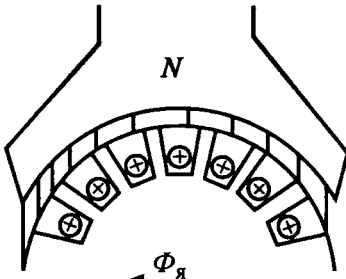


Рис. 12.6

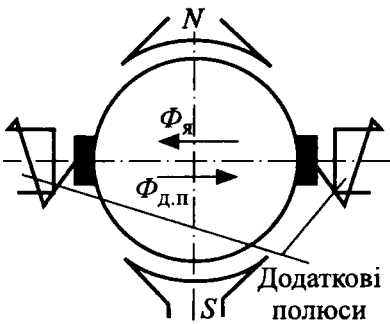


Рис. 12.7

власне магнітне поле (рис. 12.5). Якщо об'єднати всі верхні та всі нижні провідники, то легко визначити напрям магнітного поля якоря. Магнітний потік якоря спрямований *уперек* основного магнітного потоку.

12.4.2. *Взаємодія потоку якоря з основним магнітним потоком називається реакцією якоря машини постійного струму (або поперечною реакцією).*

Лінія нульової індукції перетворюється на *фізичну нейтраль*.

12.4.4. Внаслідок реакції якоря:

- спотворюється основний магнітний потік;
- на геометричній нейтралі встановлюється індукція, відмінна від нуля;
- взагалі магнітний потік послаблюється.

Реакція якоря — надто небажане явище.

12.4.5. Щоб зменшити вплив реакції якоря, у генераторах та двигунах застосовують *додаткові полюси* (рис. 12.7). Додаткові полюси встановлюють на геометричній нейтралі. Обмотка додаткових полюсів вмикається послідовно в коло якоря, і створене поперечне поле компенсує поле якоря.

12.4.6. Вплив реакції якоря зменшують за допомогою *компенсаційних обмоток*. На рис. 12.8 показано, як компенсаційна обмотка укладається в пази, що зроблені в полюсному наконечнику. Вона також вмикається послідовно у коло якоря. У такий спосіб збуджується поле, що компенсує поле якоря. На рис. 12.9 наведено схему вмикання обмотки додаткових полюсів та компенсаційної обмотки.

12.4.7. Додаткові полюси та компенсаційні обмотки можуть значною мірою усунути вплив реакції якоря. Але компенсаційні обмотки використовуються рідше через підвищення вартості електричної машини.

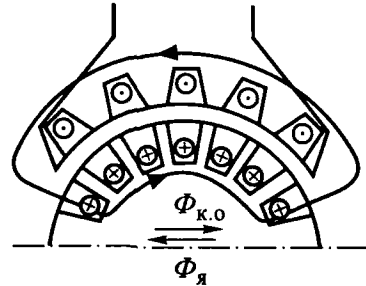


Рис. 12.8

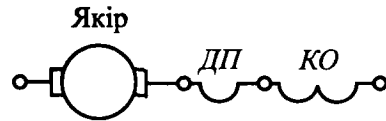


Рис. 12.9

12.5. Комутація

12.5.1. *Комутацією у машині постійного струму називаються перемикання щітками пластин колектора і явища, пов'язані зі зміною напрямку струму в секції.*

12.5.2. При перемиканні пластин колектора виникає *іскріння*. Це дуже небажане явище, яке може призвести до кругового вогню та виводу колектора з ладу. Іскріння може мати характер:

- *механічний*;
- *електромагнітний*.

Іскріння механічного характеру усувається механічним шляхом. Це — проточування, шліфування, полірування та промивання колектора, регулювання щіток та всього щітково-колекторного вузла.

12.5.3. Іскріння електричного характеру виникає через швидке вимикання кола, що має велику індуктивність. В ідеальному випадку струм у секції змінює напрям на протилежний за лінійним законом (рис. 12.10). Це — *лінійна комутація*. Секція має значну індуктивність, тому реальна комутація буде *сповільненою*. У секції

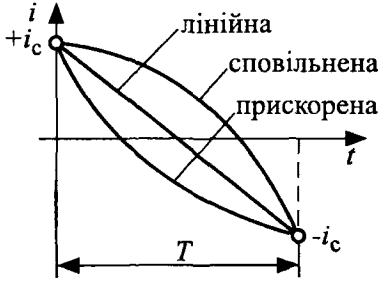


Рис. 12.10

наводиться ЕРС самоіндукції секції e_r . Крім того, наводиться також ЕРС взаємної індуктивності, обумовлена зміною струму у сусідніх секціях — e_m . Результуючу ЕРС називають *реактивною ЕРС секції*, тобто

$$e_p = e_l + e_m,$$

Можна вважати, що

$$e_p = -L_c \frac{di}{dt},$$

де L_c — якась індуктивність секції.

Ця реактивна ЕРС і протидіє зміні струму у секції, тобто сприяє сповільненій комутації. Щоб зменшити вплив реактивної ЕРС, створюють *комутуючу ЕРС секції* за допомогою додаткових полюсів. Звичайно комутуюча ЕРС спрямована проти реактивної ЕРС і компенсує її. Комутуюча ЕРС може бути досить великою.

12.5.4. Умови комутації залежать від співвідношення реактивної та комутуючої ЕРС:

$$|e_p| = |e_k| \text{ — умова лінійної комутації;}$$

$$|e_p| > |e_k| \text{ — умова сповільненої комутації;}$$

$$|e_p| < |e_k| \text{ — умова прискореної комутації.}$$

Прискорена комутація використовується у машинах, що працюють при великих навантаженнях із частим реверсуванням.

12.5.5. Комутуюча ЕРС створюється рухом секції у полі додаткових полюсів, тобто:

$$e_k = -w_c \frac{d\Phi_{д.п}}{dt},$$

де w_c — число витків секції;

$\Phi_{д.п}$ — потік додаткових полюсів.

У машинах малої потужності комутуючу ЕРС можна створити рухом секції у полі основних полюсів зсувом щіток із геометричної нейтралі у бік фізичної нейтралі. При цьому комутуюча ЕРС індукується основним магнітним потоком.

12.6. Збудження машин постійного струму

12.6.1. Стандартом передбачаються спрощений та розгорнутий способи графічного позначення машин постійного струму. На рис. 12.11 наведено стандартне зображення усіх обмоток машин постійного струму. Треба пам'ятати, що має значення кількість півкіл на позначеннях. Взаємне розташування обмоток може не враховувати напрямку магнітного потоку, що створюється обмоткою.



Рис. 12.11

12.6.2. **Збудженням** машини постійного струму називається спосіб створення основного магнітного потоку. В залежності від вмикання обмотки збудження та обмотки якоря розрізняють п'ять способів збудження.

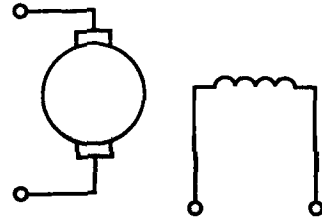


Рис. 12.12

1. **Незалежне збудження** (рис. 12.12). У цьому разі обмотка збудження вмикається на автономне джерело живлення.

2. **Паралельне (шунтове) збудження** (рис. 12.13). Обмотка збудження вмикається паралельно до обмотки якоря. Опір обмотки збудження великий, вона виготовляється багатовитковою із тонкого дроту.

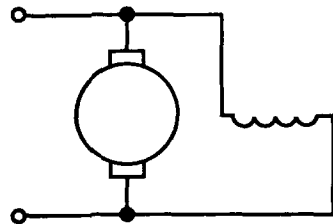


Рис. 12.13

3. **Послідовне (серієсне) збудження** (рис. 12.14). Обмотка збудження вмикається послідовно з обмоткою якоря. Струм якоря є одночасно і струмом збудження. Обмотка збудження розраховується на великий струм, має невелику кількість витків та виготовляється дротом великого перерізу.

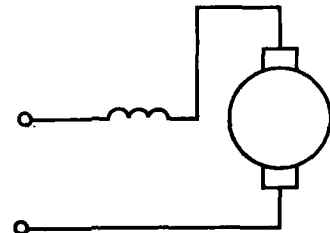


Рис. 12.14

4. *Змішане (компаундне) збудження* (рис. 12.15). Обмотка збудження має дві котушки. Одна з них умикається послідовно, а друга — паралельно до обмотки якоря. Ці машини мають свої переваги щодо машин інших типів.

5. *Збудження сталими магнітами* (рис. 12.16). Машини цього типу не мають обмотки збудження, а основний потік створюється сталими магнітами статора.

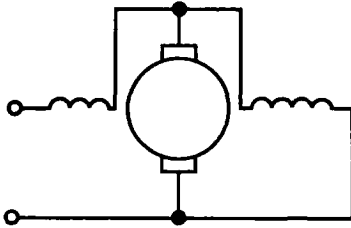


Рис. 12.15

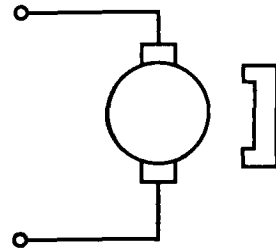


Рис. 12.16

12.7. Генератори незалежного збудження

12.7.1. Властивості та особливості роботи генераторів вивчають за їх *характеристиками* — графічними залежностями, що визначають експериментально або обчислюють теоретично. Генератори вивчають за трьома основними характеристиками. *Зовнішня характеристика генератора* — це залежність напруги на затискачах якоря від струму навантаження, коли струм збудження залишається незмінним, тобто:

$$U = U(I), \text{ при } I_3 = \text{const.}$$

Регульовальна характеристика — це залежність струму збудження від струму якоря, коли на навантаженні зберігається постійна напруга, тобто:

$$I_3 = I_3(I), \text{ при } U = \text{const.}$$

Характеристика холостого (неробочого) ходу — це залежність ЕРС якоря від струму збудження, коли вимкнуте коло навантаження, тобто:

$$E = E(I), \text{ при } \omega = \text{const.}$$

12.7.2. *Характеристика холостого (неробочого) ходу* генератора незалежного збудження є одночасно також і магнітною характеристикою

12. Машина постійного струму

системи (рис. 12.17). Як і крива намагнічування, характеристика повторює форму петлі гістерезису. Після вимикання збудження машини залишкова ЕРС буде значно більшою, ніж на початку роботи генератора. Залишковий магнетизм нестійкий і через деякий час зменшується.

12.7.3. Зовнішня характеристика генератора (залежність напруги на навантаженні від струму навантаження при нерегульованому колі збудження) наведена на рис. 12.18. Основне рівняння генератора має вигляд:

$$U = E - I \sum R_{\text{я}},$$

де втрати у колі якоря:

$$I \sum R_{\text{я}} = I(R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}} + R_{\text{к.о}} + R_{\text{ш.к}}).$$

Якщо навантаження вимкнене ($I = 0$), то $U = E$. При підвищенні струму навантаження втрати ($I \sum R_{\text{я}}$) збільшуються, а напруга зменшується. З іншого боку, підвищення струму зменшує основний потік через вплив реакції якоря. Це зменшує ЕРС, $E = C_e \Phi n$, тобто також зменшує напругу на навантаженні. З основного рівняння генератора можна обчислити струм короткого замикання (при $R_{\text{н}} = 0, U = 0$):

$$I_{\text{к}} = \frac{E}{\sum R_{\text{я}}}.$$

12.7.4. *Регульовальна характеристика* (залежність струму збудження від струму якоря при постійній напрузі на навантаженні) наведена на рис. 12.19. Щоб зберегти напругу на навантаженні при збільшенні струму якоря, треба збільшити струм збудження. Це впливає з основного рівняння генератора:

$$U = E - I \sum R_{\text{я}}.$$

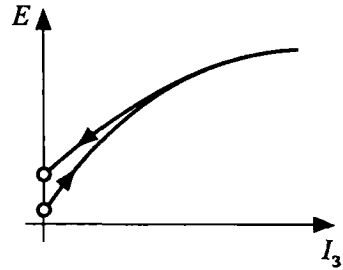


Рис. 12.17

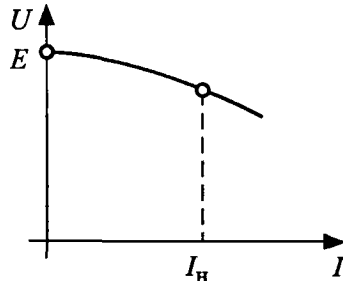


Рис. 12.18

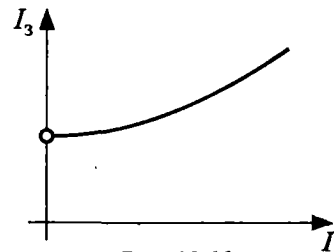


Рис. 12.19

Збільшення струму збудження спричиняє збільшення основного магнітного потоку, збільшення ЕРС і дає змогу залишити незмінною напругу U .

12.8. Самозбудження генераторів

12.8.1. У більшості генераторів обмотка збудження з'єднується так чи інакше з обмоткою якоря. Невеликий залишковий магнітний потік при обертанні якоря індукуює у ньому якусь ЕРС, що створює струм як у обмотці якоря, так і в обмотці збудження. Цей струм через деякий час стає достатнім для збудження номінального магнітного потоку. Ці генератори називаються *генераторами із самозбудженням*. Отже, усі генератори, крім генераторів незалежного збудження, є генераторами із самозбудженням.

12.8.2. Якщо обмотка збудження увімкнена паралельно до обмотки якоря, то

$$i_3 = \frac{E + e_L}{R_3 + R_\text{я}},$$

де R_3 — опір обмотки збудження.

Враховуючи, що $R_3 \gg R_\text{я}$, $e_L = -L \frac{di_3}{dt}$, можна дістати залежність:

$$E = i_3 R_3 + L \frac{di_3}{dt}.$$

Це рівняння характеристики холостого (неробочого) ходу генератора $E = f(i_3)$. При розкручуванні якоря генератора поступово зростають магнітний потік і струм збудження. Таке зростання обмежене магнітним насиченням осердя. Перехідний процес закінчується, коли ЕРС самоіндукції обмотки збудження дорівнює нулеві. Це відповідає збудженню генератора, а усталений струм збудження можна визначити за співвідношенням:

$$e_L = -L \frac{di_3}{dt} = 0.$$

Цій умові відповідає точка перетину двох кривих:

$$E = E(I_3);$$

$$E = I_3 R_3,$$

12. Машини постійного струму

що наведені на рис. 12.20. Аналізуючи залежність $E = E(I_3)$, можна дійти висновку, що є такий нахил прямої (опір обмотки збудження R_3), коли криві не перетинаються, тобто самозбудження не спостерігається.

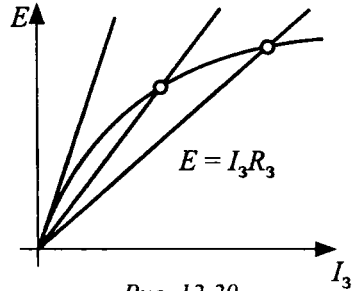


Рис. 12.20

12.8.3. Можна визначити *три умови самозбудження*:

- потрібен залишковий магнітний потік у статорі;
- необхідне збігання за напрямком залишкового потоку з потоком, що створює машина;
- опір кола обмотки збудження має бути меншим за критичний.

12.9. Генератори із самозбудженням

12.9.1. *Генератори паралельного збудження* мають багато спільного з генераторами незалежного збудження завдяки тому, що струм збудження незначною мірою впливає на струм якоря та реакцію якоря. *Характеристика холостого (неробочого) ходу та регульовальна характеристика генератора паралельного збудження не відрізняються від характеристик генератора незалежного збудження* (рис. 12.17 і рис. 12.19).

12.9.2. Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження більш падаюча, ніж генератора незалежного збудження (рис. 12.21).

Рівняння генератора:

$$U = E - I \sum R_{\text{я}}$$

Зменшення U з підвищенням струму можна пояснити:

- збільшенням втраг у колі якоря $I \sum R_{\text{я}}$;
- збільшенням реакції якоря, тобто послабленням потоку та зменшенням ЕРС;
- зменшенням струму збудження, що також послаблює потік.

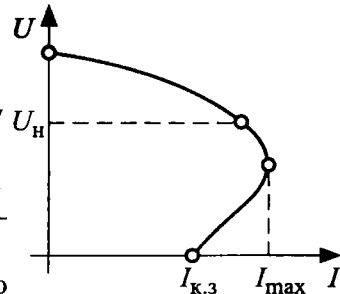


Рис. 12.21

Значне зменшення напруги призводить до падіння струму збудження. Після критичного струму настає саморозмагнічення генератора. У режимі короткого замикання струм збудження дорівнює нулеві, і потік обумовлюється тільки залишковим магнітним потоком. Тому струм короткого замикання незначний:

$$I_{к.з} = \frac{E_0}{\sum R_{я}}$$

Генератор паралельного збудження не боїться короткого замикання (струм короткого замикання менший за номінальний струм).

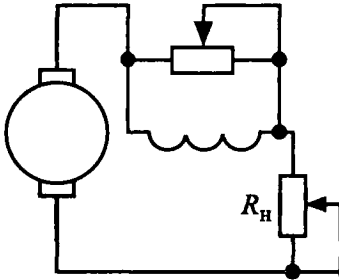


Рис. 12.22

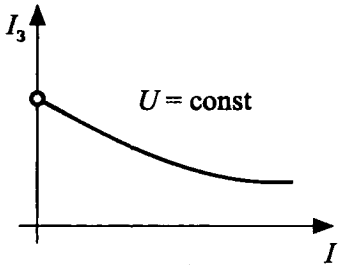


Рис. 12.23

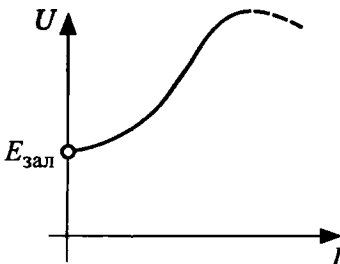


Рис. 12.24

12.9.3. У генераторах послідовного збудження коло якоря є також і колом збудження, тобто:

$$I_3 = I.$$

Тому генератор не має характеристики холостого (неробочого) ходу.

Відсутня також і регульовальна характеристика, яку знімають штучно за схемою, наведеною на рис. 12.22. Штучна регульовальна характеристика є дуже незручною, тому що вона має падаючий характер (рис. 12.23). Зовнішня характеристика генератора послідовного збудження відрізняється від характеристик генераторів інших типів (рис. 12.24). Із збільшенням струму якоря збільшується струм збудження, магнітний потік, ЕРС та напруга. Більшість споживачів працюють при сталій напрузі живлення. Тому генератори послідовного збудження у промисловості майже не використовуються.

12.9.4. Генератори змішаного збудження мають дві обмотки збудження — послідовну та паралельну. Від способу з'єднання обмоток залежить вигляд

12. Машини постійного струму

зовнішньої характеристики (рис. 12.25). Узгоджене вмикання обмоток (магніто-рушійні сили спрямовані в один бік) дає змогу підтримувати постійну напругу на навантаженні. Зустрічне вмикання (МРС спрямовані назустріч одна одній) дає змогу одержати характеристику, що забезпечує порівняно постійний струм навантаження (електроліз, зварювання).

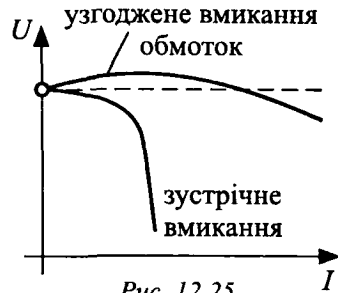


Рис. 12.25

12.10. Двигуни незалежного та паралельного збудження

12.10.1. Основне рівняння двигуна:

$$U = E + I \sum R_{я}.$$

Якщо розглядати особливості пуску, то при $n = 0$

$$E = C_e \Phi n = 0,$$

тобто пусковий струм більший за номінальний:

$$I_{п} = \frac{U}{\sum R_{я}} \gg I_{н}.$$

Пусковий струм у 20...30 разів більший за номінальний.

12.10.2. Для обмеження пускового струму використовують один із трьох способів пуску.

1. Пуск за допомогою пускового реостата (додатковий опір у колі якоря):

$$I_{п} = \frac{U}{\sum R_{я} + R_{д}}.$$

$R_{д}$ вибирають таким, що

$$I_{п} = (2...3)I_{н}.$$

2. Пуск при зниженій напрузі, що подається на якір двигуна, здійснюється за допомогою джерела регульованої ЕРС.

3. Прямий пуск (здійснюється для двигунів малої потужності, до 1 кВт).

12.10.3. Двигуни описуються *механічною характеристикою* (залежністю числа обертів якоря від електромагнітного моменту)

$$n = n(M).$$

12.10.4. *Механічні характеристики двигунів незалежного та паралельного збудження майже однакові.* Із рівняння двигуна

$$I \sum R_{\text{я}} = U - E,$$

використовуючи $E = C_e \Phi n$, $M = C_m \Phi I$, можна одержати:

$$\frac{M}{C_m \Phi} \sum R_{\text{я}} = U - C_e \Phi n,$$

звідки випливає —

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M \sum R_{\text{я}}}{C_e C_m \Phi^2}.$$

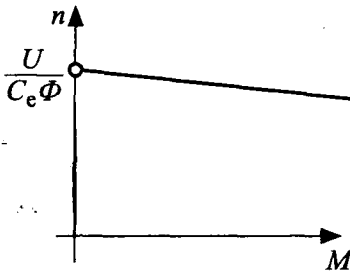


Рис. 12.26

Це *рівняння механічної характеристики* двигунів паралельного чи незалежного збудження. Характеристика лінійна відносно M (рис. 12.26). Механічна характеристика вважається жорсткою (число обертів якоря незначно залежить від електромагнітного моменту). Двигун має стійкі оберти неробочого ходу:

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}.$$

12.11. Двигуни послідовного збудження

12.11.1. Особливістю двигунів послідовного збудження є те, що струм якоря є також і струмом збудження, тобто $I_{\text{з}} = I$. Основний магнітний потік пов'язаний із струмом якоря, тобто має місце пропорційність $\Phi \sim M$.

Оскільки $M = C_m \Phi I$, $M \sim \Phi^2$, тобто $\Phi \sim \sqrt{M}$.

У загальному випадку рівняння механічної характеристики двигуна має такий вигляд:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M \sum R_{\text{я}}}{C_e C_m \Phi^2}.$$

12. Машина постійного струму

При послідовному збудженні це рівняння перетворюється:

$$n = \frac{U}{C_1 \sqrt{M}} - \frac{\sum R_{\text{я}}}{C_2}.$$

Це *рівняння механічної характеристики* двигуна послідовного збудження (C_1, C_2 — коефіцієнти пропорційності).

12.11.2. Механічна характеристика двигуна послідовного збудження м'яка (рис. 12.27), тобто число обертів якоря значною мірою залежить від електромагнітного моменту. Двигун послідовного збудження витримує великі перевантаження при помірному підвищенні струму та стійко працює при значно знижених обертах якоря. При малих навантаженнях оберти нескінченно підвищуються, двигун “іде в рознос”. Двигуни такого типу треба використовувати з постійним навантаженням на валу. Розвантажувати такий двигун не можна.

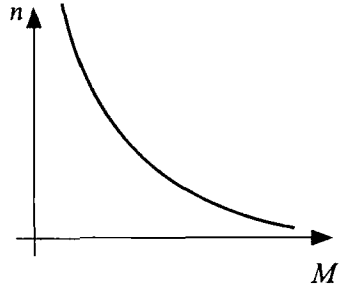


Рис. 12.27

12.12. Двигуни змішаного збудження

12.12.1. Особливістю двигуна змішаного збудження є те, що магнітний потік створюється двома обмотками, тобто:

$$\Phi = \Phi_{\text{пос}} + \Phi_{\text{пар}}.$$

Із рівняння двигуна —

$$I \sum R_{\text{я}} = U - E,$$

де $E = C_e n (\Phi_{\text{пос}} + \Phi_{\text{пар}})$, можна дістати рівняння механічної характеристики:

$$n = \frac{U - I \sum R_{\text{я}}}{C_e (\Phi_{\text{пос}} + \Phi_{\text{пар}})}.$$

Механічна характеристика двигуна змішаного збудження (компаундного двигуна) є проміжною між характеристиками двигуна паралельного та послідовного збудження.

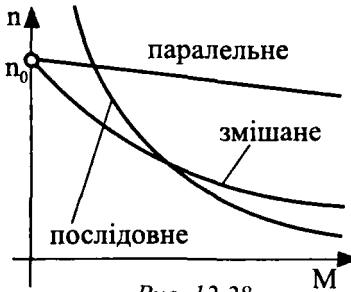


Рис. 12.28

12.12.2. На рис. 12.28 наведені механічні характеристики двигунів із різними способами збудження. Розрізняють два типи компаундних двигунів. У двигунах **послідовно-паралельного збудження** переважає послідовне збудження. Механічна характеристика досить м'яка, але двигун не боїться розвантаження, тобто збільшення обертів при розвантаженні двигуна обмежене.

У двигунах **паралельно-послідовного збудження** переважає паралельне збудження. Механічна характеристика такого двигуна жорстка, але м'якша, ніж характеристика двигуна паралельного збудження.

12.13. Регулювання швидкості обертання якоря

12.13.1. Великою перевагою двигунів постійного струму є **можливість регулювання швидкості обертання якоря** у широких межах кількома досить простими способами.

12.13.2. Регулювання швидкості обертання якоря можна розглянути на прикладі двигуна паралельного (незалежного) збудження. Рівняння механічної характеристики такого двигуна має вигляд:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M \sum R_{\text{я}}}{C_e C_M \Phi^2}$$

Із цього виразу випливає, що є **три способи регулювання швидкості обертання якоря**:

- зміною напруги;
- зміною опору кола якоря;
- зміною магнітного потоку.

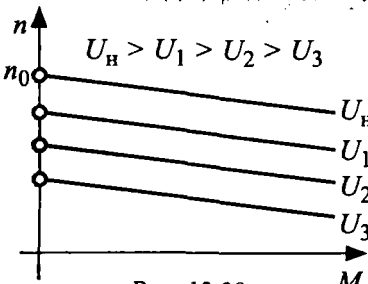


Рис. 12.29

12.13.3. **Регулювання зміною напруги** використовується у системах "генератор — двигун". При зміні напруги другий член рівняння механічної характеристики (характеризує нахил прямої) не змінюється. Тому усі прямі будуть паралельні одна одній (рис. 12.29).

12. Машини постійного струму

Характеристики різняться обертами неробочого (холостого) ходу (першим членом рівняння). Цим способом можна регулювати оберти у дуже широких межах, аж до зупинки якоря. Недоліком цього способу є необхідність використання джерела з регульованою ЕРС.

12.13.4. **Регулювання швидкості** обертання якоря **введенням додаткового опору** у коло якоря також дає змогу змінювати оберти у широких межах (до зупинки якоря). При збільшенні опору кола якоря збільшується другий член рівняння механічної характеристики, тобто збільшується нахил прямих (рис. 12.30). Цей спосіб невигідний з енергетичної точки зору — виникають додаткові втрати на регулюючому реостаті.

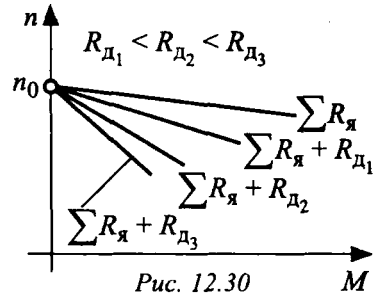


Рис. 12.30

12.13.5. **Змінюючи струм збудження, можна змінювати магнітний потік статора.** При зменшенні потоку збільшується перший та зменшується (у квадраті) другий член рівняння механічної характеристики.

Тобто є зона, де при послабленому потоці швидкість обертання буде більшою, ніж швидкість при номінальному потоці (рис. 12.31). Але при зменшенні струму збудження до нуля швидкість обертання буде обмеженою:

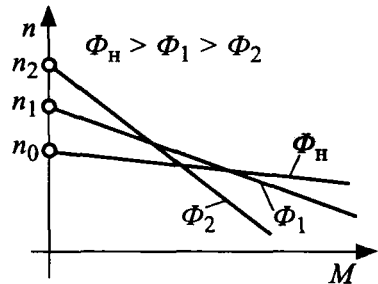


Рис. 12.31

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_{\text{зал}}}$$

Цей спосіб є ефективнішим. Зазвичай використовують різні способи регулювання або їх комбінації в залежності від конкретних умов експлуатації двигуна.

12.14. Втрати у машинах постійного струму

12.14.1. Втрати та ККД машини можна розглянути на прикладі двигуна паралельного збудження. ККД двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

де P_2 — корисна потужність на валу,
 P_1 — потужність, що споживається з мережі.

Корисна потужність на валу:

$$P_2 = M_2 \omega,$$

де M_2 — реальний обертальний момент на валу.

Потужність, що споживається з мережі,

$$P_1 = UI_{\text{дв}} = U(I + I_3),$$

тобто враховуються втрати енергії і в обмотці збудження.

Таким чином, ККД можна визначити за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P},$$

де $\sum P$ — сумарні втрати у двигуні.

12.14.2. Сумарні втрати складаються з таких видів втрат:

1. Втрати в обмотці збудження:

$$P_3 = I_3 U = I_3^2 R_3.$$

2. Втрати в обмотці якоря:

$$P_я = I^2 \sum R_я.$$

3. Втрати механічні $P_{\text{мех}}$ — це втрати від тертя, охолодження двигуна та інше. Вони залежать від особливостей експлуатації, і точно розрахувати їх неможливо.

4. Втрати магнітні у якорі ($P_{\text{м.я.}}$) пов'язані з явищем реакції якоря.

Таким чином,

$$\sum P = P_3 + P_я + P_{\text{мех}} + P_{\text{м.я.}}$$

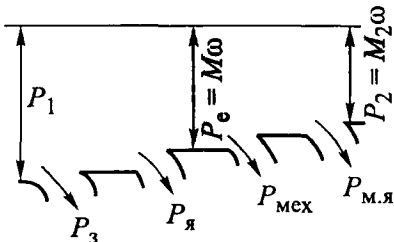


Рис. 12.32

12.14.3. З енергетичної діаграми (рис. 12.32) бачимо, що електромагнітна потужність (P_e) відрізняється від P_1 на втрати в обмотках збудження та якоря:

$$P_1 - P_e = P_3 + P_я.$$

2. Машина постійного струму

Оскільки втрати моменту (M_B), які залежать від $P_{\text{мех}} + P_{\text{м.я.}}$, теоретично визначити важко, механічна характеристика будується щодо електромагнітного моменту. Щоб знайти реальний момент M_2 , необхідно зсунути пряму паралельно собі на величину втрат M_B (рис. 12.33).

12.14.4. ККД машин постійного струму залежить від її потужності та навантаження (рис. 12.34). ККД машин змінюється від нуля (при неробочому ході) до найбільшого (при номінальній потужності). ККД машин промислового використання становить 80...90%. В авіаційних двигунах та генераторах постійного струму ККД — 75...80%.

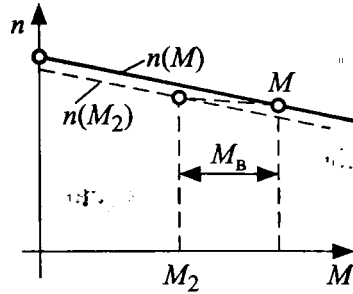


Рис. 12.33

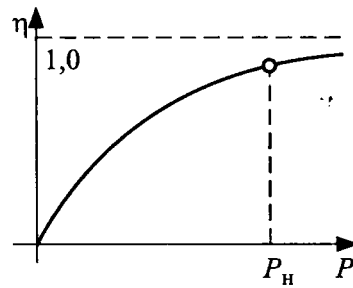


Рис. 12.34

12.15. Колекторні машини змінного струму

12.15.1. Зміною напрямку струму в обмотці збудження двигуна постійного струму змінюють напрям основного магнітного потоку. При цьому змінюється напрям дії обертового моменту. Змінити напрям обертання можна також зміною напрямку струму якоря. Тобто, *якщо одночасно змінити напрями струмів збудження і якоря, то напрям обертового моменту не зміниться*. Одночасна зміна напрямку струмів збудження і якоря просто відтворюється у двигунах послідовного збудження (у цих машинах $I = I_3$). *Машину послідовного збудження принципово можна використати як колекторний двигун однофазного змінного струму.*

12.15.2. Колекторні двигуни змінного струму реалізують основні переваги машин постійного струму. Двигуни досить просто регулюються, дають можливість одержати дуже високі оберти якоря, мають великий пусковий момент. Колекторний двигун можна також використовувати

як універсальний, тобто вмикати на постійну і на змінну напруги. Колекторні двигуни змінного струму використовуються:

- у побутових електроприладах;
- у приладах та апаратах, що потребують універсального живлення;
- в установках, що потребують плавного регулювання числа обертів якоря;
- на транспорті (електротяга у вигляді однофазного колекторного двигуна) у декотрих країнах.

12.15.3. Конструкція колекторної машини принципово не відрізняється від машини постійного струму. Статор явноплюсний з обмоткою збудження, якір із колектором. На відміну від машини постійного струму корпус статора та полюси виконуються шихтованими для зменшення втрат від вихрових струмів.

12.15.4. У колекторних машинах змінного струму погіршені умови комутації. Тому двигуни мають деякі конструктивні особливості. Комутація у колекторних двигунах змінного струму характеризується так:

- у секції, що комутується, наводиться реактивна ЕРС (e_p);
- для компенсації реактивної ЕРС створюється комутуюча ЕРС (e_k);
- у секції, яка комутується, через періодичну зміну головного магнітного потоку, що проймає витки секції, виникає ще трансформаторна ЕРС (e_t).

Діюче значення трансформаторної ЕРС —

$$E_T = 4,44 f w_c \Phi_m,$$

де f — частота магнітного поля;

w_c — число витків секції.

Умовою лінійної комутації буде:

$$e_p + e_t + e_k = 0.$$

12.15.5. Щоб зменшити трансформаторну ЕРС, зменшують число витків у секції (w_c). Але щоб залишити обертальний момент, збільшують число секцій. Тому колекторні двигуни змінного струму мають велике число секцій, а також колектор з великою кількістю пластин. Зменшити ЕРС можна також зменшенням магнітного потоку.

12. Машини постійного струму

Проте, щоб залишити обертальний момент, збільшують число пар полюсів. Тому колекторні двигуни змінного струму мають велике число пар полюсів. Силу струму короткого замикання, що виникає у секції, обмежують опором, увімкнутим у цю секцію. Струм якоря протікає через такий опір лише під час комутації (рис. 12.35).

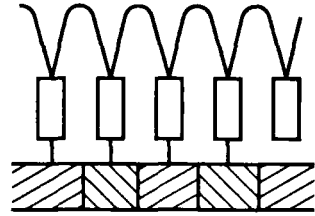


Рис. 12.35

12.15.6. Показники двигуна при роботі на змінному струмі гірші, ніж показники роботи на постійному струмі. *В універсальному двигуні при живленні від джерела синусоїдного струму використовується тільки частина обмотки збудження.*

12.15.7. Реакція якоря колекторного двигуна змінного струму має пульсуючий характер. Для компенсації явища реакції якоря, крім додаткових полюсів, завжди *використовують компенсаційні обмотки*. Майже усі колекторні двигуни змінного струму мають компенсаційні обмотки.

13. ЕЛЕКТРИЧНІ МІКРОМАШИНИ

13.1. Класифікація та призначення

13.1.1. Електричні машини малої потужності (від одиниць до кількох сотень ват) називаються *мікромашинами*. Електричні мікромашини застосовуються в системах керування та регулювання, побутових приладах, гіроскопічних пристроях, у пристроях обчислювальної техніки. Електричні мікромашини дають змогу вирішувати завдання комплексної механізації і автоматизації виробничих процесів.

13.1.2. Є кілька принципів класифікації електричних мікромашин. Мікромашини *загального застосування* — це двигуни малої потужності постійного та змінного струму. *Мікромашини автоматичних пристроїв і приладів* виконують, крім того, окремі функції щодо вимірювання кута, швидкості та прискорення, перетворення напруги, частоти тощо.

Тому електричні мікромашини можна поділити на:

- електричні мікродвигуни;
- інформаційні мікромашини;
- перетворювачі та підсилювачі потужності.

13.2. Колекторні мікромашини постійного струму

13.2.1. Електричні мікродвигуни можна класифікувати:

- колекторні мікродвигуни постійного, змінного струму та універсальні;
- асинхронні;
- синхронні.

13.2.2. Мікродвигуни постійного струму використовують у різних приводах автоматичних пристроїв. Двигуни, що перетворюють електричну енергію (енергію електричного сигналу) у механічне переміщення вала, називають *виконавчими двигунами постійного струму*.

13. Електричні мікромашини

Такі двигуни мають якір звичайного типу, або порожнистий, або гладкий, або дисковий чи циліндровий із друкованою обмоткою.

13.2.3. Поширений *мікродвигун з якорем звичайного типу*. Ця машина конструктивно не відрізняється від двигуна постійного струму загальнопромислового виконання, але має малу потужність. Корпус і полюси статора шихтуються у вигляді одного пакета. Обмотка якоря приєднується до колектора, струм подається за допомогою щітково-колекторного вузла. Такий двигун і за характеристиками майже не відрізняється від двигунів загальнопромислового виконання.

Є машини зі збудженням від сталих магнітів. На статорі цих двигунів розташований сталий магніт циліндричної форми або кілька магнітів. У виконавчих двигунах магнітну систему роблять ненасиченою. В цьому разі реакція якоря не впливає на магнітний потік машини, тобто і на частоту обертання вала.

13.2.4. Двигун постійного струму з *порожнистим немагнітним якорем* (рис. 13.1) має таку будову. Рухомими частинами є вал 1, порожнистий якір 2 та колектор 3. У порожнечі якоря розташовано осердя 4, що називається внутрішнім статором (нерухоме). На статорі знаходиться обмотка збудження 5 з осердям 6. Це — зовнішній статор.

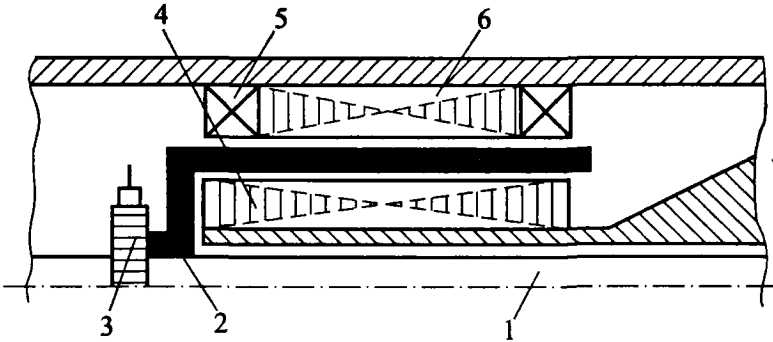


Рис. 13.1

Порожнистий якір являє собою пластмасовий стакан, в який запресовано обмотку якоря. Обмотка також може наноситися на поверхню порожнистого якоря друкованим методом.

Така конструкція має переваги в порівнянні зі звичайним колекторним двигуном постійного струму:

— якір має дуже малу інерційність;

— якір не має феромагнітних ділянок, тому вплив реакції якоря незначний;

— через відсутність радіальних сил притягування якоря до статора зменшуються момент тертя та відповідно механічні втрати двигуна;

— якір не має зубців, тому індукція у зазорі розподіляється рівномірно, що сприяє зникненню пульсацій.

13.2.5. Для ще більшого зменшення інерції рухомих частин використовують *мікродвигуни з дисковим якорем*. Якір являє собою тонкий неметалевий диск із друкованою обмоткою. Як колектор працюють неізольовані ділянки провідників, розташовані на поверхні диска. Дискові та порожнисті якорі виготовляють також з алюмінію.

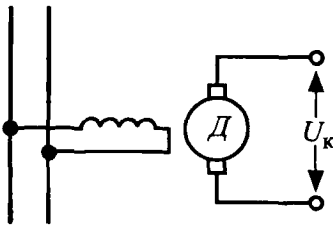


Рис. 13.2

Двигуни з дисковим якорем недовговічні через знос міді друкованих провідників у місці розташування щіток. Двигуни з порожнистим та дисковим якорем менш надійні при вібраціях та ударах.

ККД двигунів із порожнистим та дисковим якорем майже такий самий, як ККД мікродвигуна постійного струму з барабанним якорем (0,3...0,45).

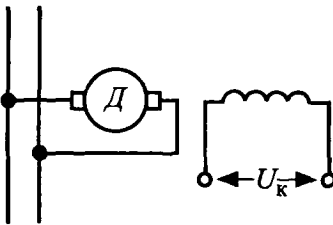


Рис. 13.3

13.2.6. У виконавчих мікродвигунах постійного струму обмотка збудження не приєднується до обмотки якоря. Отже, мікромашини використовують як двигуни постійного струму незалежного збудження. Тому регулювати швидкість обертання вала можна:

— зміною напруги керування на обмотці якоря (якірне керування, рис. 13.2);

— зміною напруги керування на обмотці збудження (поліусне керування, рис. 13.3).

Відповідно до законів регулювання звичайних двигунів постійного струму з незалежним збудженням при *якірному керуванні* механічна характеристика двигуна не змінює лінійності характеру (рис. 13.4). Якірне керування усуває виникнення самоходу двигуна.

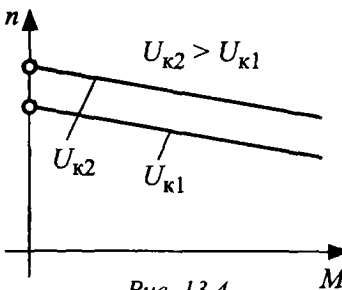


Рис. 13.4

13. Електричні мікромашини

Полюсне керування мікродвигуном викликає як зміну швидкості обертання вала, так і нахил кривих механічної характеристики (рис. 13.5). При полюсному керуванні (порівняно з якірним) споживається менша потужність керування, але змінюється жорсткість механічної характеристики.

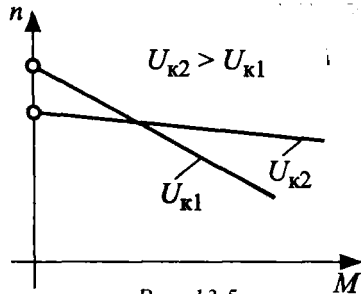


Рис. 13.5

13.2.7. Ряд мікромашин виконують без обмотки якоря, зі сталими магнітами. В цьому разі у порожнечі порожнистого якоря (рис. 13.1) замість осердя 4 розташовують сталий магніт, а ротор виконують без обмотки. При цьому можна застосувати тільки полюсне керування.

13.2.8. **Тахогенератором** називають електричну машину, що працює у генераторному режимі і перетворює енергію обертання вала на електричний сигнал.

Конструкція тахогенератора постійного струму не відрізняється від конструкції мікродвигуна постійного струму. Якір може бути звичайним барабанним, або порожнистим, або дисковим із друкованою обмоткою. Тахогенератор може мати сталі магніти або незалежне збудження. Струм збудження підтримується постійним.

Основною є вихідна характеристика тахогенератора — залежність напруги на навантаженні від швидкості обертання вала.

ЕРС генератора постійного струму —

$$E = C_e \Phi n,$$

лінійна відносно швидкості обертання вала. На рис. 13.6 наведена вихідна характеристика тахогенератора постійного струму.

Характеристика лінійна, нахил залежить від опору навантаження. Для підвищення лінійності вихідної характеристики доцільно завантажувати тахогенератор на великий зовнішній опір.

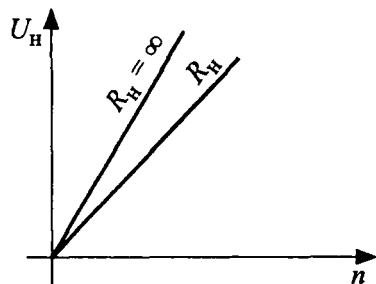


Рис. 13.6

13.3. Асинхронні мікромашини

13.3.1. Асинхронний виконавчий мікродвигун використовується у системах керування, автоматики. Виконавчий асинхронний мікродвигун перетворює електричний сигнал на рух вала. Двигун повинен забезпечити регулювання швидкості обертання вала зі зміною сигналу при постійному навантаженні.

Асинхронний виконавчий мікродвигун — це керований двигун.

13.3.2. Розрізняють три типи виконавчих двигунів:

- із короткозамкненим ротором типу “біляче колесо”;
- із порожнистим немагнітним ротором;
- із порожнистим феромагнітним ротором.

13.3.3. Виконавчий асинхронний двигун *із короткозамкненим ротором* не відрізняється від звичайного асинхронного двигуна. Для зменшення інерційності рухомих частин застосовують ротори малого діаметра відносно його довжини. Але момент інерції ротора такого двигуна залишається досить великим.

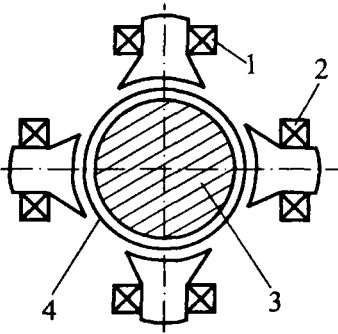


Рис. 13.7

Двигун із порожнистим немагнітним ротором має значно меншу інерційність (рис. 13.7).

Зовнішній статор такого двигуна має дві обмотки — обмотку збудження 1 і обмотку керування 2. Внутрішній статор 3 — нерухома частина машини. У повітряному зазорі розташований порожнистий немагнітний ротор 4, що виконується у вигляді циліндра зі стопів алюмінію. Товщина стінок коливається у межах 0,2...1 мм.

Змінна напруга подається на дві взаємно перпендикулярні котушки статора, і створюється обертове магнітне поле. Обертове поле індукуює у роторі ЕРС, що, у свою чергу, індукуює вихрові струми на поверхні порожнистого ротора. Створюється система “провідник із струмом у магнітному полі”, тобто виникає електромагнітна сила та електромагнітний момент.

Порожнистий немагнітний ротор має великі переваги у порівнянні з ротором барабанного типу:

13. Електричні мікромашини

— дуже невеликий індуктивний опір, що підвищує лінійність механічної характеристики;

— дуже малий момент інерції;

— відсутність радіальних сил, що сприяє зменшенню моменту тертя і відповідно моменту пуску, а також зменшенню рівня шумів.

Недоліком мікродвигуна з порожнистим немагнітним ротором є великий немагнітний зазор. Цей зазор складається з товщини стінки ротора та двох повітряних зазорів. Це зменшує коефіцієнт потужності та ККД двигуна (20...25% порівняно з 40...50% для двофазного двигуна з ротором барабанного типу). Відповідно зростають габарити та вага мікродвигуна.

Асинхронний двигун із порожнистим феромагнітним ротором має значно менший немагнітний зазор. У цьому випадку внутрішній статор відсутній, тому що потік замикається в роторі. Порожнистий ротор виконують більш товстостінним для зменшення активного опору та оптимізації магнітного потоку. Це призводить до збільшення маси ротора, тобто підвищує інерційність та зменшує швидкість двигуна. Недоліком такого двигуна є також можливість прилипання ротора до статора при спрацюванні підшипників.

13.3.4. Дві взаємно перпендикулярні котушки статора можуть створити кругове обертове поле за таких умов:

— котушки створюють однакові магніторушійні сили;

— ці МРС зсунуті одна до одної на 90° .

В іншому разі поле буде еліптичним, тобто обертальний момент (і швидкість обертання вала) буде меншим.

Таким чином, **за допомогою зміни амплітуди струму або зсуву фаз можна керувати мікродвигуном.**

Розрізняють три способи керування асинхронним мікродвигуном:

— амплітудне;

— фазове;

— амплітудно-фазове.

При **амплітудному керуванні** змінюється величина напруги на обмотці керування, і таким чином регулюється швидкість обертання ротора. На рис. 13.8 наведені механічні характеристики

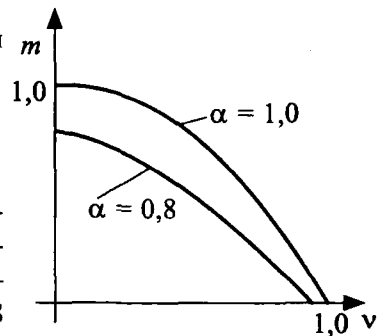


Рис. 13.8

виконавчого асинхронного мікродвигуна з амплітудним керуванням у відносних величинах, де $m = \frac{M}{M_k}$ — відносний момент, M — реальний момент, M_k — момент при круговому полі, $v = \frac{n_2}{n_1}$ — відносна частота обертання вала, $\alpha = \frac{u_k}{u_3}$ — коефіцієнт сигналу, u_k — напруга на обмотці керування, u_3 — напруга на обмотці збудження.

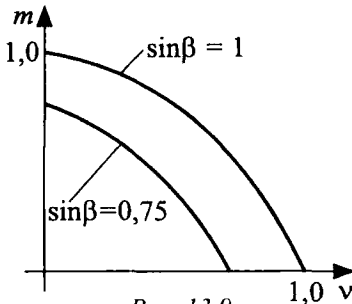


Рис. 13.9

При *фазовому керуванні* напруги на обмотках залишаються сталими. Регулювання швидкості обертання вала здійснюється зміною кута між векторами напруги на обмотці керування та обмотці збудження за допомогою фазорегулятора. На рис. 13.9 наведені механічні характеристики асинхронного мікродвигуна з порожнистим немагнітним ротором при фазовому керуванні (у відносних одиницях), де β — кут між вектором напруги керування та вектором напруги збудження.

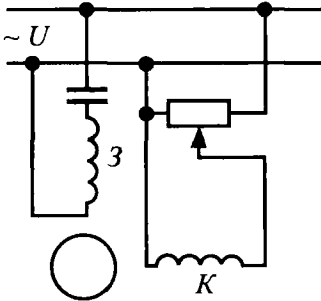


Рис. 13.10

На рис. 13.10 наведено схему двигуна з *амплітудно-фазовим керуванням (конденсаторне)*. Ємність у колі збудження зсуває фазу напруги збудження, а напруга керування регулюється реостатом. Механічні характеристики двигуна з таким способом керування (рис. 13.11) нагадують характеристики двигуна з амплітудним керуванням, де α_k — коефіцієнт сигналу при круговому полі.

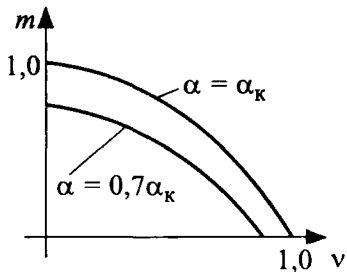


Рис. 13.11

Розглянуті способи керування дають змогу регулювати швидкість обертання вала у дуже широких межах (1...200).

Деякі переваги має амплітудно-фазове керування (простота схеми, великі пускові моменти). Але при цьому дещо знижується стійкість у зоні малих частот обертання.

13.3.5. *Асинхронні тахогенератори* використовують для вимірювання швидкості обертання вала як датчики прискорюючих та сповільнюючих сигналів зворотних зв'язків у системах автоматичного регулювання, як елементи стабілізування швидкості обертання, як елементи обчислювальних пристроїв для розв'язування задач диференціювання та інтегрування функцій. Конструкція тахогенератора принципово не відрізняється від конструкції виконавчого асинхронного мікродвигуна з порожнистим немагнітним ротором.

В ідеальному випадку тахогенератор повинен давати на виході, що пропорційна швидкості обертання:

$$U_{\text{вих}} = kn$$

або

$$U_{\text{вих}} = k \frac{d\theta}{dt},$$

де θ — кут повороту.

На рис. 13.12 наведено схему асинхронного тахогенератора, де 3 — обмотка збудження, Γ — генераторна обмотка статора.

Вихідні характеристики тахогенератора залежать від опору навантаження. Лінійність порушується в зоні підвищених частот (рис. 13.13).

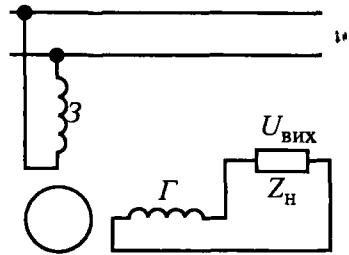


Рис. 13.12

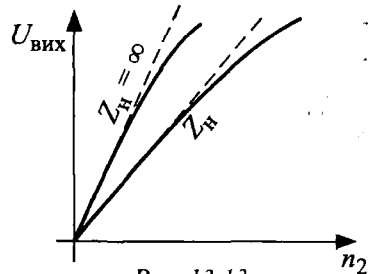


Рис. 13.13

13.4. Синхронні мікромашини

13.4.1. Синхронні мікромашини, як і звичайні синхронні машини, мають ту особливість, що частота обертання $n_1 = n_2$ жорстко зв'язана з частотою мережі живлення f_1 . Тому синхронні двигуни використовуються в основному у пристроях, де треба підтримувати постійну швидкість обертання (у годинникових та програмних механізмах, радіо приладах, механізмах стрічкопротягання приладів, кіноустаткуванні). Крім того, синхронні генератори дають змогу індукувати ЕРС підвищеної частоти та вимірювати швидкість обертання вала.

Синхронні мікромашини можна класифікувати у такий спосіб:

- синхронні мікродвигуни зі сталими магнітами;
- реактивні двигуни;
- індукторні машини;
- крокові двигуни;
- синхронні тахогенератори.

13.4.2. У синхронних мікродвигунах ротор має сталі магніти та пускову короткозамкнену обмотку типу “біляче колесо”. Пуск такого двигуна здійснюється простим вмиканням у мережу.

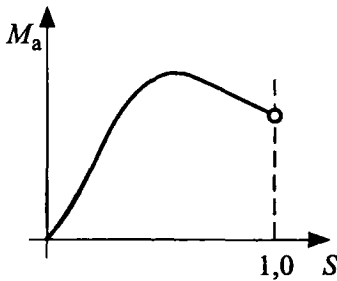


Рис. 13.14

Під час пуску до входу двигуна у синхронізм машина працює в асинхронно-му режимі. Ротор створює два моменти:

- асинхронний;
- гальмівний.

Звичайний асинхронний момент (M_a) створюється “білячою кліткою” (рис. 13.14).

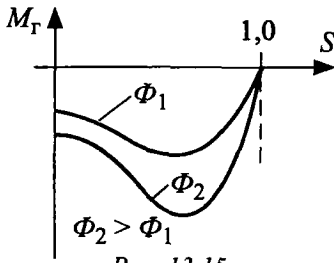


Рис. 13.15

Сталі магніти на роторі створюють гальмівний момент. Цей момент відсутній у звичайних синхронних двигунах, тому що під час пуску обмотка збудження вимикається від джерела постійного струму. Сталі магніти створюють тим більший гальмівний момент, чим більший ступінь збудження цих магнітів (рис. 13.15). Момент, що розганяє ротор, є результатом:

$$M = M_a + M_r.$$

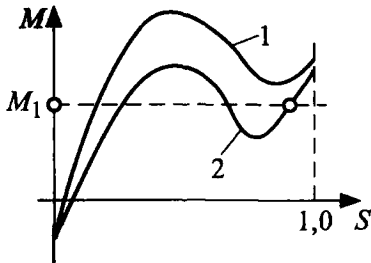


Рис. 13.16

На результуючій механічній характеристиці з'являються провали, що погіршують умови пуску (рис. 13.16). Наприклад, при моменті на валу M_1 крива 2 (коли високий ступінь збудження сталих магнітів) не забезпечує синхронного обертання вала. І тільки зменшення збудження дає змогу ввійти в синхронізм.

13. Електричні мікромашини

Двигуни зі сталими магнітами порівняно з іншими типами синхронних машин мають більші ККД та коефіцієнт потужності, високу стабільність швидкості обертання. Але вони споживають більший пусковий струм, що має значення при роботі від напівпровідникових перетворювачів.

13.4.3. *Реактивний синхронний мікродвигун* має явнопольосний ротор зі сталими магнітами. Магнітна анізотропія спричиняє виникнення тангентальної сили, яка орієнтує ротор таким чином, щоб магнітний опір був мінімальним (рис. 13.17). Як і в двигунах інших типів, швидкість обертання ротора дорівнює швидкості обертання поля.

Магнітна анізотропія ротора може створюватися не тільки формою сталих магнітів. На рис. 13.18 наведено ротор реактивного синхронного мікродвигуна, що складається з пакетів листової електротехнічної сталі, які розділяються алюмінієм.

Реактивні двигуни мають невеликий пусковий момент та $\cos\phi$, не більший за 0,5. Але ці двигуни мають просту конструкцію, надійніші та дешевші за синхронні двигуни з обмоткою збудження на роторі. Вони не потребують джерела живлення постійного струму для обмотки ротора.

13.4.4. *Гістерезисним синхронним мікродвигуном* називається машина, обертальний момент котрої створюється завдяки явищу магнітного запізнення при перемагніченні ротора. Статор такого двигуна має звичайну конструкцію з полюсами, що створюють обертове магнітне поле.

Основним матеріалом ротора є магнітотвердий феромагнетик. Цей матеріал має дуже широку петлю гістерезису.

Під дією магнітного поля статора ротор намагнічується, але через явище гістерезису вісь намагнічення відстає від осі обертового магнітного поля. Завдяки куту непогодження і виникає гістерезисний момент.

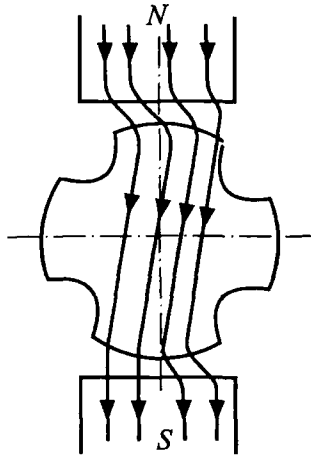


Рис. 13.17

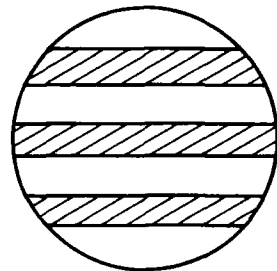


Рис. 13.18

Якщо момент опору на валу буде більший за гістерезисний, то двигун не працюватиме у синхронному режимі. Чим ширша петля гістерезису, тим більший гістерезисний момент.

Перевагами гістерезисних мікродвигунів є простота конструкції і надійність в роботі, високий ККД (55...65%), малий пусковий струм. Але вартість машини значно підвищується через дорогі феромагнетики. Коефіцієнт потужності гістерезисних мікродвигунів не перевершує 0,5.

13.4.5. В електричних машинах спостерігається явище зубцевих коливань, тобто нестійкість значень електричних величин (струму, напруги, ЕРС) через зубцеве виконання ротора барабанного типу. Це, звичайно, небажане явище. Але в *індукторних машинах* спеціальна конструкція ротора дає змогу генерувати ЕРС підвищеної частоти.

Статор *індукторного синхронного генератора* має обмотку збудження і обмотку якоря, в котрій індукується змінна ЕРС. Ротор виконується без обмотки з великою кількістю зубців. Ротор обертається зовнішньою силою, і через наявність зубців потік обмотки збудження перетворюється у пульсуючий. Цей потік проймає обмотку якоря та наводить ЕРС, частота котрої повністю визначається швидкістю обертання ротора і кількістю зубців:

$$f_1 = \frac{z_2 n_2}{60},$$

де f_1 — частота ЕРС генератора;
 z_2 — кількість зубців ротора;
 n_2 — швидкість обертання ротора.

Індукторні генератори мають низький ККД (до 0,5) через великі додаткові втрати у сталі, пов'язані з високою частотою перемагнічування.

13.4.6. *Крокові синхронні двигуни* дають змогу імпульси електричної величини перетворити на пульсуючий рух ротора.

Статор крокового двигуна має явні полюси з обмотками керування. Ротор буває кількох типів. Досить поширений ротор зі сталими магнітами.

На обмотки керування подають імпульси напруги від комутатора. Обмотки створюють поле, що стрибками змінює свою орієнтацію відповідно до імпульсів джерела. Ротор синхронним моментом орієнтується згідно з полем статора також стрибками.

Крокові синхронні мікродвигуни поширені у цифровій обчислювальній техніці та приладах керування.

13. Електричні мікромашини

13.5. Інформаційні мікромашини

13.5.1. Інформаційні електричні мікромашини призначені для перетворення кута повороту, кутової швидкості або прискорення у електричний сигнал.

До інформаційних мікромашин можна віднести:

- поворотні трансформатори;
- сельсини.

13.5.2. *Поворотні трансформатори* належать до електричних машин змінного струму. Поворотні трансформатори виготовляються для частоти струму 400 Гц та вище.

Поворотний трансформатор — це така машина, що перетворює кут повороту вала в напругу, котра пропорційна цьому куту або його функції (косинусу або синусу).

Поворотні трансформатори поширені в автоматичних та обчислювальних пристроях, у системах автоматичного регулювання для вимірювання непогодження. Вони також використовуються у пристроях для розв'язування геометричних та тригонометричних задач, пов'язаних із побудовою трикутників, перетворенням координат тощо.

Конструкція поворотних трансформаторів дає змогу використати кілька схем їх вмикання. У залежності від схем вмикання можна розрізнити *кілька режимів роботи поворотних трансформаторів*:

а) синусно-косинусні поворотні трансформатори забезпечують напругу, на одній вихідній обмотці пропорційну *синусу*, а на іншій — пропорційну *косинусу* кута повороту;

б) *лінійний* поворотний трансформатор забезпечує вихідну напругу, пропорційну куту повороту вала;

в) *побудовник* — це поворотний трансформатор, на дві вхідні обмотки котрого подаються сигнали, пропорційні складовим вектора у прямокутних координатах, а на виході знімається напруга та кут, що характеризують його модуль і аргумент;

г) *масштабні* поворотні трансформатори на виході видають напругу, пропорційну вхідній, а коефіцієнт пропорційності визначається кутом повороту.

13.5.3. За конструкцією ковзного контакту поворотні трансформатори можуть бути:

- контактні;
- безконтактні.

Контактні поворотні трансформатори мають контактні кільця на роторі, аналогічні кільцям асинхронного двигуна з фазним ротором. У безконтактних поворотних трансформаторах напруга з обмоток ротора знімається або за допомогою спіральних пружин, або магнітним зв'язком.

Поворотний трансформатор складається з двох частин:

- *статора*;
- *ротора*.

Статор має осердя з матеріалу, що має малий магнітний опір (шихтоване осердя з електротехнічної сталі або пермалою). Статор має дві взаємно перпендикулярні обмотки.

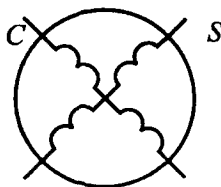
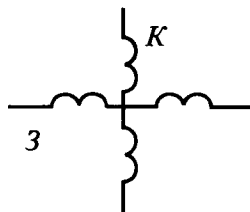


Рис. 13.19

Ротор також має феромагнітне осердя та дві взаємно перпендикулярні обмотки (рис. 13.19).

13.5.4. У будь-якому разі обмотка збудження статора Z вмикається на мережу змінного струму та індукує у машині магнітний потік. Цей потік, у свою чергу, індукує ЕРС в обмотках ротора. Частота цієї ЕРС дорівнює частоті струму у мережі, а діюче значення залежить від розташування ротора відносно статора.

Якщо використовувати як робочу обмотку S ротора (синусну), то ЕРС цієї обмотки буде пропорційна синусові кута повороту вала. **Такий поворотний трансформатор називається синусним.**

Якщо за робочу взяти обмотку C ротора (косинусну), то ЕРС цієї обмотки буде пропорційна косинусу кута повороту вала. **Це — косинусний поворотний трансформатор.**

При використанні обох обмоток ротора (в межах коефіцієнта трансформації $k = 0,52 \dots 0,56$) можна отримати лінійну залежність вихідної напруги від кута повороту вала. **Такий поворотний трансформатор називається лінійним.**

13.5.5. В обмотках ротора поворотного трансформатора протікає струм, тобто має місце явище реакції ротора. Компенсація цієї реакції

13. Електричні мікромашини

називається *симетруванням* поворотного трансформатора. Симетрування дає змогу значно зменшити похибки у трансформаторі.

Симетрування буває:

- первинне (з боку статора);
- вторинне (з боку ротора).

Первинне симетрування полягає в тому, що обмотка статора K (компенсаційна) умикається на опір Z_k або накоротко. Навантаження вмикається на одну обмотку ротора (синусу або косинусу), рис. 13.20.

При вторинному симетруванні (наприклад, лінійного поворотного трансформатора) компенсаційна обмотка та обмотка синуса з'єднуються послідовно і вмикаються на навантаження Z_1 . Напряга на цьому опорі є вихідною напругою трансформатора. Опір навантаження косинусної обмотки Z_2 підбирається з умови сталого вихідного опору. Схема лінійного поворотного трансформатора з *вторинним симетруванням* наведена на рис. 13.21.

13.5.6. *Трансформатор-побудовник* використовують для визначення гіпотенузи прямокутного трикутника за двома катетами, для перетворення координат із прямокутної системи у полярну.

Масштабні поворотні трансформатори застосовують для узгодження масштабів окремих вузлів схем.

13.5.7. Електричні мікромашини синхронного зв'язку називаються сельсинами. Сельсини забезпечують синхронний і синфазний поворот або обертання двох чи кількох осей, що не зв'язані механічно між собою. У простішому випадку синхронний зв'язок здійснюється за допомогою двох сельсинів, що зв'язані між собою електрично.

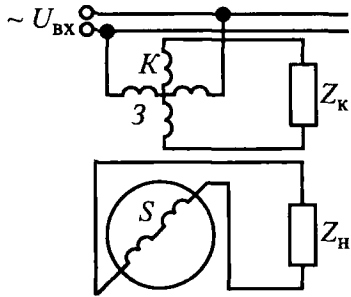


Рис. 13.20

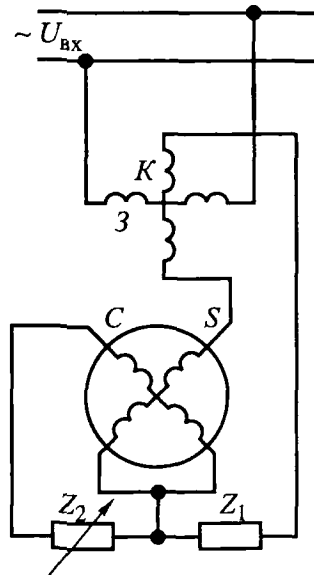


Рис. 13.21

Сельсин, який механічно з'єднаний з ведучою віссю, називається **давачем**. Другий сельсин з'єднується з веденою віссю та називається **приймачем**.

При повороті ротора сельсина-давача на кут θ_d ротор сельсина-приймача повинен повернутися на такий самий кут θ_n . Тобто система прагне ліквідувати непогодження між положенням роторів давача і приймача, що характеризується кутом непогодження $\theta = \theta_d - \theta_n$. В ідеальному випадку система забезпечує $\theta \rightarrow 0$.

Системи синхронного зв'язку забезпечують:

- синхронність повороту (передавання кута);
- синхронність обертання (електричний вал).

Розрізняють два режими роботи сельсинів:

- індикаторний;
- трансформаторний.

В **індикаторному режимі** сельсин-давач задає кут повороту. Сельсин-приймач не має моменту опору на валу, а звичайно має тільки індикаторну стрілку. Між сельсинами є лише електричний зв'язок. Стрілка відхиляється на кут, що відповідає куту θ_d .

У **трансформаторному режимі** на валу сельсина-приймача діє момент опору, тобто ротор приймача повертає якийсь механізм. У цьому разі сигнал непогодження підсилюється та подається на виконавчий механізм.

13.5.8. Сельсини за кількістю фаз бувають:

- однофазні;
- трифазні.

За конструкцією контактів сельсини поділяються на:

- контактні;
- безконтактні.

Робота контактних сельсинів у системах синхронного зв'язку принципово не відрізняється від роботи безконтактних сельсинів.

Будова сельсина нагадує конструкцію асинхронного двигуна з фазним ротором.

Сельсин має:

- статор;
- ротор.

13. Електричні мікромашини

Дві обмотки (збудження та синхронізації) можуть бути розташовані як на статорі, так і на роторі. Обмотка збудження завжди вмикається на мережу змінного струму і створює пульсуючий магнітний потік. Обмотку синхронізації завжди виконують із трьох катушок, що з'єднують зіркою. Якщо обмотка збудження розташована на роторі, то сельсин має два контактних кільця. Якщо на роторі розташована обмотка синхронізації, то сельсин має три контактних кільця.

Деякі сельсини мають короткозамкнену демпферну обмотку, або механічні демпфери.

13.5.9. При *індикаторному режимі* роботи на валу приймача майже відсутній момент опору. Для повороту ротора приймача потрібен незначний обертальний момент.

Обмотки збудження давача і приймача вмикаються в мережу змінного струму (рис. 13.22). Обмотки синхронізації з'єднані між собою лінією зв'язку ЛЗ.

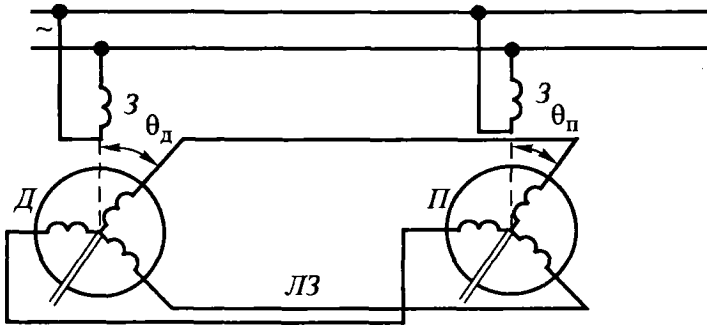


Рис. 13.22

Пульсуючі потоки, що створюються обмотками збудження, індукують в обмотках синхронізації ЕРС. Якщо кут непогодження $\theta = \theta_{\text{д}} - \theta_{\text{п}}$ не дорівнює нулеві, то в обмотках протікає струм, що створює в машинах синхронізуючі моменти.

Вал давача загальмований, тому синхронізуючий момент повертає вал приймача на той самий кут $\theta_{\text{п}} = \theta_{\text{д}}$.

Інколи треба передати на відстань кутову величину в кілька місць. Це може бути, коли встановлено декілька пультів керування або

спостереження. В цьому разі до одного сельсина-давача вмикають декілька сельсинів-приймачів (рис. 13.23).

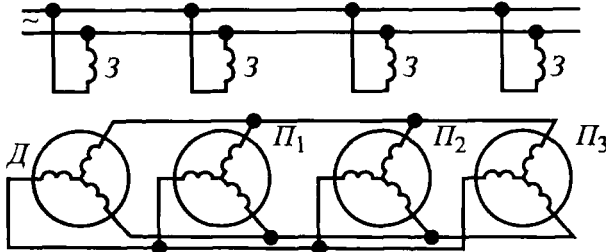


Рис. 13.23

У **трансформаторному режимі** обмотка збудження приймача індукує ЕРС відповідно куту непогодження (рис. 13.24). Цей сигнал через підсилювач Π_{id} подається на обмотку керування виконавчого двигуна $ВД$, котрий повертає також вісь приймача. Коли непогодження ліквідується, вихідна напруга стає рівною нулеві, і вісь зупиниться.

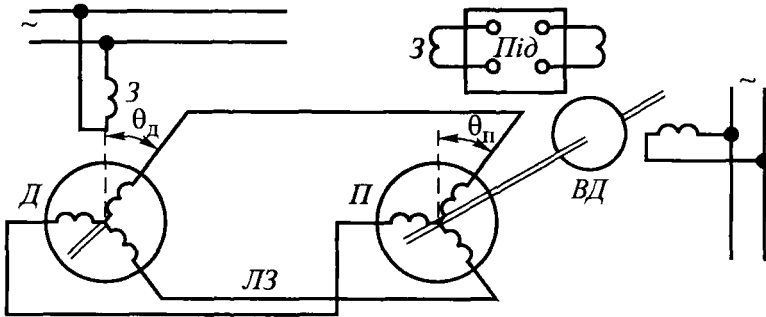


Рис. 13.24

13.5.10. **Трифазні сельсини** являють собою звичайні асинхронні двигуни з фазним ротором. Обмотки статора вмикаються в загальну трифазну мережу змінного струму. Обмотки ротора через контактні кільця з'єднуються лінією зв'язку.

На рис. 13.25 наведено схему, що називається **електричним валом**. Така схема трифазних сельсинів дає змогу стабілізувати обертання двох виконавчих механізмів ($ВМ1$ і $ВМ2$). Виконавчі механізми працюють від асинхронних двигунів $АД1$ і $АД2$. На одному валу з ними розташовані сельсини $С_1$ і $С_2$, що з'єднані між собою лінією зв'язку.

13. Електричні мікромашини

При синхронному обертанні струм у лінії зв'язку відсутній. При непогодженні в сельсинах виникають синхронізуючі моменти. Один момент підвищує швидкість відстаючого механізму, а другий — гальмує механізм, що працює з випередженням. Поступово система наближається до узгодження.

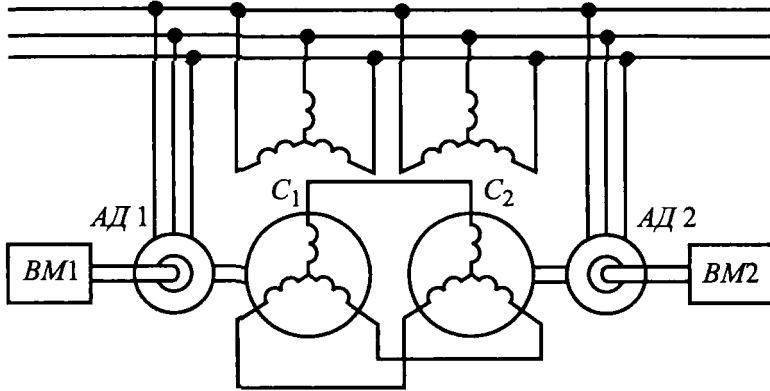


Рис. 13.25

13.5.11. Сельсини застосовуються в системах синхронного зв'язку для пристроїв автоматики, телемеханіки, вимірювальної техніки тощо. Широко використовуються електричні мікромашини також для перетворення величини та виду напруги, частоти струму. Електромашинні підсилювачі за допомогою сигналу малої потужності керують великою потужністю вихідного сигналу. Електричні мікромашини застосовуються досить широко у різних галузях техніки.

14. ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

14.1. Основні визначення

14.1.1. Електричний двигун перетворює електричну енергію на обертальний рух, створює обертальний момент. Цей момент використовується для роботи виконавчого механізму.

Для спільної роботи двигуна та виконавчого механізму необхідні механічні узгоджуючі елементи та елементи керування двигуном, захисту тощо.

Електроприводом називається електромеханічна система, що складається з електродвигуна (електродвигунів), передатного механізму, апаратури та елементів керування, захисту і охолодження.

14.1.2. *Груповий привод* передбачає використання електродвигуна для кількох споживачів. У цьому разі застосовують двигун дуже великої потужності. Звичайно ККД таких двигунів дуже високий (значно вищий за ККД двигунів малої потужності). Але оскільки в груповому приводі треба застосувати дуже багато механічних узгоджуючих пристроїв, груповий привод здебільшого не використовується.

Одиночний (індивідуальний) привод передбачає використання менших за габаритами та потужністю електричних двигунів, що мають нижчий ККД. Але завдяки кращому узгодженню з робочою машиною досягають загалом більшої економічності.

При використанні тільки одного двигуна у приводі часто є змога зовсім не застосовувати механічні узгоджуючі пристрої. Інколи це досягають використанням кількох двигунів із різними характеристиками для окремих робочих органів виконавчого механізму. Іноді передатні пристрої можна спростити або зовсім не використовувати завдяки застосуванню двигунів із регульованою швидкістю обертання вала.

14.1.3. Керування виконавчим механізмом пов'язане зі зміною характеристик механічного передаточного пристрою (зубчасті з'єднання, муфти, фрикціони тощо). Електропривод дає змогу замінити механічне

1 4. Електропривод та електропостачання

керування електричним або електромеханічним. Таке керування можна автоматизувати, воно підвищує темп роботи механізму, виконує функції захисту, контролю та в цілому підвищує ефективність роботи виконавчого механізму.

14.1.4. Електричний двигун дає рух передатному механізму та робочій машині. Навантаження на валу двигуна складається із статичної та динамічної складових. Статична складова ($M_{ст}$) обумовлена моментами опору обертання вала (сили різання, тертя, ваги тощо). Динамічна складова ($M_{дин}$) виникає при зміні обертів усіх рухомих частин приводу, тобто:

$$M = M_{ст} + M_{дин},$$

де M — обертальний момент двигуна.

Динамічний момент $M_{дин}$ можна визначити за співвідношенням:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt},$$

де J — момент інерції.

Взагалі момент інерції

$$J = \int_m r^2 dm,$$

де m — маса тіла,

r — відстань до осі симетрії.

Величина

$$R_{ін} = \sqrt{\frac{J}{m}}$$

називається радіусом інерції тіла.

Момент інерції визначають за формулою:

$$J = mR_{ін}^2.$$

Радіуси інерції тіл різної форми наведено в технічних довідниках.

14.1.5. Зазвичай між високошвидкісним двигуном та низькошвидкісною робочою машиною є передаточний механізм. Дуже важливо розрахувати момент інерції системи з різними швидкостями обертання окремих частин приводу. Користуються штучним способом зведення системи. Тобто систему електропривода замінюють одним елементом,

що обертається з кутовою швидкістю двигуна. Умовою зведення є сталі енергетичні умови:

$$M'\omega = M_M\omega_M,$$

де M' — зведений момент робочої машини;

ω — кутова швидкість вала двигуна;

M_M — дійсний момент робочої машини;

ω_M — кутова швидкість робочої машини.

Передатний коефіцієнт

$$k = \frac{\omega}{\omega_M}$$

дає змогу дістати співвідношення —

$$M' = M_M \frac{1}{k}.$$

За умови незмінності кінетичної енергії, тобто:

$$J' \frac{\omega^2}{2} = J_{\text{дв}} \frac{\omega^2}{2} + J_M \frac{\omega_M^2}{2},$$

можна знайти зведений момент інерції цього привода —

$$J' = J_{\text{дв}} + J_M \frac{1}{k^2},$$

де J' — зведений момент інерції системи;

$J_{\text{дв}}$ — момент інерції електродвигуна;

J_M — момент інерції робочої машини.

14.2. Режими роботи електропривода

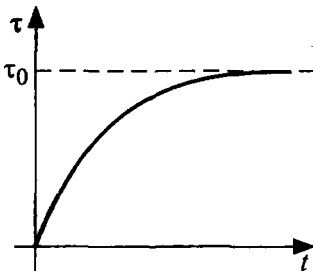


Рис. 14.1

14.2.1. Втрати у електричному двигуні перетворюються на теплову енергію. Нагрівання двигуна змінюється за експонентою (рис. 14.1). Вважають, що потужність двигуна вибрано правильно, коли його температура сягає допустимого значення при тривалій роботі електропривода.

1 4. Електропривод та електропостачання

Охолодження двигунів електропривода може реалізуватися різними шляхами.

Природне охолодження — це охолодження двигуна за рахунок обертового ротора. Двигун при цьому не має спеціального пристрою для збільшення швидкості повітря.

При **самоохолодженні** у зазори між статором і ротором повітря нагнітається вентилятором, розташованим на роторі.

При **примусовому** охолодженні холодне повітря нагнітається вентилятором, котрий має спеціальний привод.

14.2.2. Режими роботи електродвигуна розрізняють за тривалістю його вмикання та часом паузи. Можна навести три режими роботи:

- довготривалий;
- короткочасний;
- повторно-короткочасний.

14.2.3. При **довготривалому** режимі двигун працює з постійним навантаженням тривалий час. Тепло, в котре перетворюються втрати у двигуні, дорівнює відведеному теплу. Встановлюється теплова рівновага та стала температура двигуна τ_0 (рис. 14.1).

При **короткочасному** режимі двигун вмикається на сталі навантаження на короткий термін. При цьому не досягається теплова рівновага. Після вимикання двигуна витримується така пауза, при котрій машина повністю охолоджується.

Повторно-короткочасний режим характеризується періодичністю вмикання та вимикання двигуна на навантаження. Тривалість роботи двигуна мала і теплова рівновага у межах одного циклу не досягається. Температура двигуна також не досягає сталого значення, а за час паузи двигун не охолоджується до температури довкілля.

14.2.4. Вводять поняття відносної тривалості вмикання (ТВ), котру виражають у відсотках:

$$ТВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100,$$

де t_p — час роботи двигуна з навантаженням,
 t_0 — час вимикання двигуна (пауза).

Звичайні стандартні значення $ТВ = 15, 25, 40, 60\%$. Величина ТВ використовується при виборі потужності двигуна електропривода.

14.3. Вибір потужності двигуна

14.3.1. При узгодженні двигуна з виконавчим механізмом треба визначитися з:

- потужністю двигуна;
- обертальним моментом;
- частотою обертання;
- можливістю зміни частоти обертання;
- напругою та родом струму;
- пусковими характеристиками;
- конструктивним виконанням тощо.

Якщо потужність двигуна буде малою, то виникне недопустиме нагрівання. При зовеликій потужності електропривод буде неекономічним. Обертальний момент повинен забезпечити пуск під навантаженням. Але якщо пусковий момент буде зовеликий, то можуть статися пошкодження через поштовхоподібний пуск.

14.3.2. Основним критерієм вибору потужності двигуна електропривода є нагрівання двигуна. Якщо стала температура τ_0 не перевищує допустиму, то це можна вважати основною залежністю:

$$\tau_0 \leq [\tau],$$

де $[\tau]$ — допустима температура працездатності окремих елементів двигуна.

Найменше значення $[\tau]$ звичайно мають ізоляційні матеріали (60...70 °С). Є кілька методів вибору потужності двигуна.

14.3.3. *Метод середніх втрат* базується на умові, що середні втрати потужності за цикл роботи не перебільшують втрат при номінальному навантаженні, тобто

$$\Delta P_c \leq \Delta P_n,$$

де ΔP_c — середні втрати за цикл роботи,

ΔP_n — номінальні втрати при роботі зі сталим навантаженням.

Середні втрати розраховують за графіком навантаження.

14.3.4. *Метод еквівалентних величин* передбачає абстрактне введення розрахункових (еквівалентних) струмів, потужності, моменту.

Еквівалентним вважають такий сталий струм, при котрому у двигуні виникають такі ж втрати, як і при роботі зі змінним навантаженням.

14. Електропривод та електропостачання

Еквівалентний струм можна визначити як:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2 t_k}{t_{\text{ц}}}},$$

де I_k — реальний струм двигуна при навантаженні у k -ому інтервалі навантаження,

$$t_{\text{ц}} = \sum_{k=1}^n t_k \text{ — час циклу.}$$

Умовою правильного вибору двигуна електропривода є

$$I_{\text{екв}} \leq I_{\text{н}},$$

де $I_{\text{н}}$ — номінальний струм двигуна.

14.4. Вибір типу електродвигуна

14.4.1. Вибір типу електродвигуна залежить від технічних характеристик приводу:

- швидкості обертання;
- необхідності регулювання швидкості обертання;
- потужності;
- умов пуску;
- економічності тощо.

Аналіз характеристик двигуна дає змогу узгодити електродвигун із виконавчим механізмом і за іншими показниками (конструктивними, техніко-економічними, габаритними тощо).

14.4.2. *Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором* є найрозповсюдженішим у нерегульованих приводах. Його перевагою є висока надійність, простота експлуатації, низька вартість. Двигун має досить жорстку механічну характеристику щодо стійкої роботи. Спеціальна конструкція “білячого колеса” (глибокий паз або подвійна “біляча клітка”) значно підвищують пусковий момент та зменшують пускові струми. Обслуговування, захист, пуск та регулювання таких двигунів дуже прості. Тому близько половини електроприводів використовують асинхронний короткозамкнений двигун. Треба пам’ятати,

що для регулювання швидкості обертання ротора можна використовувати перетворювач частоти. Ступінчасто регулювати швидкість обертання можна зміною пар полюсів обмотки статора.

14.4.3. Якщо привод потребує регулювання швидкості обертання у нешироких межах, можна використати **асинхронний двигун із фазним ротором**. Він має дуже великий пусковий момент, може використовуватися при частих вмиканнях. Двигун із фазним ротором доцільно застосовувати у приводах підйомних кранів, пресів, ліфтів, прокатних станів тощо.

Двигун із фазним ротором значно зменшує ККД електропривода за рахунок електричних втрат у регулювальному реостаті. Треба пам'ятати, що регулювання швидкості можна здійснити тільки у бік зменшення частоти від синхронної до нуля.

14.4.4. **Двигуни постійного струму** зручно застосовувати тоді, коли необхідне широке регулювання швидкості, часті пуски та реверсування.

Двигун паралельного збудження має жорстку механічну характеристику і застосовується у приводах великих верстатів, потужних прокатних станів, потужних екскаваторів.

Двигун послідовного збудження має м'яку механічну характеристику, великий пусковий момент. Двигуни цього типу можуть забезпечити дуже велику швидкість обертів вала, стійко працюють при великому навантаженні зі значно зменшеними обертами ротора. Такі двигуни застосовуються на електротранспорті, у приводах допоміжних механізмів.

14.4.5. В електроприводах, що потребують сталої швидкості обертів вала, застосовують **синхронні двигуни**. Синхронні двигуни мають дуже високі ККД та коефіцієнт потужності. Двигун ефективно працює у приводах із нечастими пусками середньої та великої потужності (компресори, потужні насоси).

Синхронний двигун має абсолютно жорстку механічну характеристику (оберти вала майже не залежать від навантаження). Тому ці двигуни використовуються і в спеціальних приводах (годинникові механізми, програмні механізми).

14.4.6. Інколи привод потребує двигуна, що живиться як від змінної, так і від постійної напруги. В цьому разі застосовують **універсальні двигуни та колекторні двигуни змінного струму**. Двигуни цього типу

14. Електропривод та електропостачання

мають м'яку механічну характеристику, дуже просто регулюються, реверсуються і пускаються. Ці двигуни мають невисокий ККД і застосовуються у електроінструментах, побутових машинах, приладах. Як і двигуни постійного струму послідовного збудження, вони дають змогу досягти дуже великих швидкостей обертання (до десятків тисяч обертів за хвилину).

14.4.7. *Конструкція двигуна* вибирається в залежності від умов експлуатації. Двигуни можуть охолоджуватися вентилятором, що змонтований на роторі, або мати примусове охолодження. Двигуни бувають із горизонтальною або вертикальною установкою вала, іншого спеціального виконання. Всі двигуни спеціального виконання підвищують вартість електропривода.

14.5. Керування електроприводом

14.5.1. Керування електроприводом та захист двигуна від короткого замикання і перевантаження може бути ручним або автоматичним. Ручне керування менш ефективно і застосовується в основному у приводах невеликої потужності.

Автоматичне керування підтримує необхідний режим роботи електропривода за заданою програмою без участі оператора.

Керування електроприводом складається з таких операцій:

- пуск та зупинка двигуна;
- регулювання швидкості обертання ротора двигуна, гальмування та реверсування;
- пуск асинхронного двигуна від джерела постійної ЕРС;
- пуск двигунів постійного струму від джерела змінної ЕРС;
- захист двигунів від короткого замикання та перевантаження.

Керування електроприводом виконується за допомогою різних апаратів та елементів керування і захисту. Електричні апарати, на відміну від електричних машин, не перетворюють електричну енергію на механічний рух чи навпаки. *Електричні апарати — це пристрої, що перетворюють електричну енергію з одними величинами в електричну енергію з іншими електричними величинами.*

14.5.2. Типовим прикладом автоматичного керування електроприводом є *керування пуском короткозамкненого асинхронного двигуна.*

Апарат керування (магнітний пускач) подає напругу на трифазну обмотку статора. При цьому є можливість змінювати чергування фаз, тобто реверсувати двигун. Пускач має теплові реле, що захищають двигун від короткого замикання та перевантаження.

Керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором виконується автоматичним вмиканням ступенів пускового реостата через визначені проміжки часу. Такий апарат має декілька реле часу, що забезпечує плавний розгін двигуна. Перемикання ступенів дає змогу змінювати швидкість обертання фазного ротора.

Автоматичне керування пуском двигуна постійного струму також полягає у послідовному вмиканні ступенів пускового реостата.

14.5.3. Застосування сучасних тиристорних схем керування дає змогу значно поліпшити характеристики двигунів.

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна залежить від швидкості обертання поля —

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$

За допомогою *тиристорного перетворювача частоти* можна змінювати частоту струму в обмотці статора f_1 , тобто і швидкість обертання ротора. Це значно розширює сферу застосування асинхронних короткозамкнених двигунів.

Тиристорним перетворювачем можна також перетворити постійну напругу у трифазну або багатофазну змінну напругу. У такий спосіб через тиристорний перетворювач асинхронний короткозамкнений двигун можна вмикати на постійну напругу та регулювати швидкість обертання його ротора.

Тиристорний перетворювач можна використати як керований випрямляч трифазної напруги. Через таку тиристорну схему можна увімкнути двигун постійного струму на трифазну синусоїдну напругу. Зміною часу затримки вмикання тиристора змінюється швидкість обертання якоря двигуна постійного струму.

14.6. Електропостачання

Слід розрізняти електропостачання країни, окремого району, підприємства або автономної енергетичної одиниці (літака, корабля, потяга тощо).

1 4. Електропривод та електропостачання

У будь-якому разі *електропостачанням називають генерування, передавання та розподілення електричної енергії між споживачами.*

Генерування електричної енергії створюється електричними станціями. Майже усі промислові електричні станції кінцевим елементом мають синхронний генератор трифазної синусоїдної напруги. Зі збільшенням одиночної потужності генератора підвищується його ККД, тому сучасні станції мають генератори дуже великої потужності.

Електричні станції можна класифікувати у такий спосіб:

- теплові;
- гідравлічні;
- атомні;
- вітроелектростанції;
- геліоелектростанції;
- геотермальні;
- припливні тощо.

Більш поширені *теплові станції*, що спалюють вугілля, торф, газ, нафту тощо. На цих станціях виробляється електрична енергія з ККД близько 40%. Теплові станції забруднюють повітря внаслідок неповного спалення пального та недостатньої фільтрації відпрацьованих газів.

Гідравлічні станції використовують енергію водяного потоку. На гідравлічних станціях виробляється значно дешевша електрична енергія. Гідроелектрична станція великої потужності має ККД, близький до 90%. Гідравлічні станції порушують водний баланс рік, що призводить до порушення екологічної рівноваги.

Атомні електростанції перетворюють енергію поділу атомного ядра в електричну енергію. ККД реактора атомної станції 27...35%. У разі аварії на атомній станції виникає загроза радіаційного забруднення середовища.

Експлуатація будь-якого джерела електричної енергії може спричинити екологічні порушення. Тому в розвинених країнах приділяється велика увага технології вироблення електричної енергії. При застосуванні сучасної технології деякі країни безпечно виробляють понад 60% електроенергії на атомних станціях.

Починається застосування вітрових та геліоелектростанцій. З великою потужністю видають електроенергію геотермальна (на Камчатці) та припливна (на Кольському півострові) станції.

14.6.1. Синхронні генератори електричних станцій індують трифазну синусоїдну ЕРС величиною 18 кВ. Для зменшення втрат у лініях електропередач на підвищувальних підстанціях напруга трансформується до 110 і 330 кВ і подається в Єдину енергетичну систему. Втрати у лініях передач пропорційні квадрату струму, тому електроенергія транспортується при підвищеній нарузі та зменшеному струмі.

Лінії електропередач бувають:

- повітряні;
- кабельні.

Повітряні лінії електропередач значно дешевші за кабельні і тому ширше застосовуються.

Звичайно електрична енергія споживається з напругою 380 В. Тому перед споживачем установлюються розподільні пункти та підстанції, що знижують напругу до 6...10 кВ та 380...220 В.

Лінії електропередач з'єднуються з трансформаторами спеціальними **високовольтними комутуючими пристроями**.

14.6.2. Розрізняють три основні схеми електропостачання споживачів:

- радіальну;
- магістральну;
- змішану.

Радіальна схема електропостачання передбачає застосування трансформаторної підстанції для кожного споживача. Це дуже надійна схема електропостачання, але потребує великої кількості підстанцій.

Магістральна схема передбачає лише декілька підстанцій, що вмикаються у лінію електропередачі. До кожної підстанції вмикається багато споживачів. Ця схема складна в експлуатації і не така надійна, але значно дешевша.

Змішана схема передбачає ділянки з радіальним і магістральним увімкненням. Споживачі вмикаються диференційовано. Така схема застосовується частіше.

14.6.3. Схема електропостачання **автономної енергетичної одиниці** може бути досить оригінальною. Особливості електропостачання залежать від функціональних завдань виконавчих механізмів, умов експлуатації, особливих вимог маси, габаритів, ККД електричних пристроїв тощо. Для прикладу можна розглянути електропостачання сучасного літака.

1 4. Електропривод та електропостачання

Джерелом механічної енергії на борту літака є авіаційний двигун. Він обертає вал синхронного генератора, що індукує електричну енергію змінного струму з несталою частотою (від 400 до 900 Гц). Значна частина споживачів електроенергії на борту літака працює безпосередньо від генератора змінної частоти. Але є також багато споживачів, що працюють від джерела постійного струму та змінного струму сталої частоти. Тому електрична енергія від генератора змінної частоти за допомогою трансформаторно-випрямних блоків перетворюється на енергію постійного струму напругою 28,5 В. Частина цієї енергії споживається пристроями постійного струму. Інша ж частина цієї енергії за допомогою динамічного перетворювача (авіаційний двигун-генератор) перетворюється на енергію трифазного змінного струму 120/208 В сталої частоти 400 Гц. Ця енергія використовується для споживачів, що працюють від змінної трифазної або однофазної напруги сталої частоти.

Крім того, на борту літака є акумуляторні батареї, що звичайно є резервним джерелом живлення і працюють тільки в аварійному режимі. У звичайному режимі акумуляторні батареї увімкнені на бортову мережу постійної напруги 28,5 В. Напруга акумуляторних батарей складає 24 В, тому вони працюють у зарядному режимі.

15. ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАННЯ

15.1. Класифікація електровимірювальних приладів

15.1.1. Електровимірювальні прилади — це такі технічні засоби, які виробляють сигнали вимірювальної інформації у формі, що доступна для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Електровимірювальні прилади можна класифікувати:

- а) за родом вимірювальної величини;
- б) за фізичним принципом дії вимірювального механізму;
- в) за родом струму;
- г) за класом точності;
- д) за типом відлікового пристрою;
- е) за виконанням залежно від умов експлуатації;
- є) за стійкістю до механічних впливів;
- ж) за ступенем захисту від зовнішніх магнітних та електричних полів тощо.

15.1.2. Електровимірювальні прилади дають змогу вимірювати як електричні, так і неелектричні величини. На шкалі наводиться назва приладу або початкова латинська літера одиниці, що вимірюється. *За вимірювальною величиною електровимірювальні прилади поділяються на:*

- вольтметри (позначаються літерою V);
- амперметри (A);
- ватметри (W);
- омметри (Ω);
- лічильники енергії (kWh);
- фазометри (φ);
- частотоміри (Hz) тощо.

До умовної літери може бути додано позначення кратності основної одиниці, наприклад: міліамперметр — mA ; кіловольтметр — kV .

15. Електровимірвальні прилади та електровимірювання

15.1.3. *За фізичним принципом дії* розрізняють такі системи електровимірвальних приладів:

- а) магнітоелектрична;
- б) електромагнітна;
- в) електродинамічна;
- г) феродинамічна;
- д) індукційна;
- е) електростатична;
- є) вібраційна тощо.

Умовні позначення на шкалі приладу характеризують класифікацію приладів за *родом струму*:

- а) постійний струм;
- б) змінний (однофазна система);
- в) постійний і змінний;
- г) трифазна система;
- д) трифазна несиметрична система.

15.1.4. *За класом точності* електровимірвальні прилади класифікуються відповідно до стандартів. Клас точності позначається цифрою, котра дорівнює зведеній похибці у відсотках, що допускає прилад. Випускають прилади таких класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. У лічильниках електроенергії класи точності такі: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5.

15.1.5. *За типом відлікового пристрою* електровимірвальні прилади можуть бути:

- показуючі;
- реєструючі;
- самопишучі;
- друкуючі;
- інтегруючі;
- підсумовуючі.

Більш поширені показуючі прилади, тобто прилади безпосередньої оцінки. Відліковий пристрій цих приладів складається зі шкали і показчика. Показчиком може бути стрілка або світлова пляма з рискою. Треба знати правила користування відліковим пристроєм. Такі показуючі прилади називаються **аналоговими**. Показання таких приладів — це безперервна функція величини, що вимірюється. В цифрових електровимірвальних приладах показання наводяться у цифровому вигляді.

15.1.6. У залежності від умов експлуатації, діапазону робочих температур та відносної вологості, електровимірювальні прилади поділяються на п'ять груп:

- група А (температура +10...+35°C, вологість 80);
- група Б (температура -30...+40°C, вологість 90);
- група В₁ (температура -40...+50°C, вологість 95);
- група В₂ (температура -50...+60°C, вологість 95);
- група В₃ (температура -50...+80°C, вологість 98).

15.1.7. За стійкістю до механічних впливів прилади поділяються залежно від значення максимально допустимого прискорення при ударах та вібраціях (м/с²). За стандартом електровимірювальні прилади поділяються на групи:

- звичайні з підвищеною міцністю (ОП);
- нечутливі до вібрацій (ВН);
- віброміцні (ВП);
- нечутливі до трясіння (ТН);
- струсоміцні (ТП);
- удароміцні (У).

Звичайні прилади групи ОП витримують прискорення до 15 м/с².

За ступенем захисту від зовнішніх магнітних та електричних полів прилади поділяються на I і II категорії. Від зовнішніх полів прилади захищаються екранами.

15.1.8. У більшості показуючих електровимірювальних приладів рухома частина пристрою переміщується внаслідок дії **обертального моменту**. Обертальний момент виникає внаслідок взаємодії магнітних або електричних полів та до деякої міри пропорційний вимірюваній величині. У вимірювальному пристрої завжди є протидіючий момент, що створюється механічною або електромагнітною силою.

Для створення механічної протидії використовується спіральна пружина, іноді для більшої чутливості — підвіси або розтяжки.

Прилади, в котрих створюється електромагнітний протидіючий момент, називають **логометрами**.

15.2. Системи електровимірювальних приладів

15.2.1. У приладах **магнітоелектричної системи** обертальний момент створюється внаслідок взаємодії сталого магніту з провідником

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

зі струмом. Рухомою частиною може бути або рамка зі струмом, або сталій магніт, розташований на осі.

Прилади магнітоелектричної системи з рухомим магнітом є приладами низьких класів точності і застосовуються як вказівні на транспортних засобах.

Електровимірювальні прилади з рухомою рамкою мають високу точність і застосовуються при більш точних вимірюваннях.

На рамку зі струмом у магнітному полі діє електромагнітна сила. Оскільки сила визначається за законом електромагнітної сили, то її обертальний момент буде пропорційний струму, що протікає в рамці. Якщо протидіючий момент створюється пружиною —

$$M_{\text{пр}} = m\alpha,$$

то кут повороту рамки (стрілки приладу) α пропорційний струму в рамці —

$$\alpha = cI,$$

де m — питомий протидіючий момент,

c — постійна величина.

Величина $c = \frac{\alpha}{I}$ називається чутливістю приладу і характеризує клас точності.

Оскільки кут повороту стрілки пропорційний струму, шкала приладів магнітоелектричної системи рівномірна, що є перевагою таких приладів.

Магнітоелектричні прилади застосовують для вимірювання постійних струмів та напруг. Вони також можуть використовуватися для вимірювання опорів як гальванометри.

Амперметри і вольтметри магнітоелектричної системи мають високий клас точності (до 0,1) і порівняно малі внутрішні втрати енергії.

Недоліком приладів цієї системи можна вважати непридатність до роботи в колах змінного струму, чутливість до перевантажень і залежність від температури середовища.

Магнітоелектричним приладом можна виконувати вимірювання в колах змінного струму, якщо в коло рухомої котушки увімкнути перетворювач змінного струму на постійний.

15.2.2. Електровимірювальний *прилад електромагнітної системи* має нерухому котушку і розташовану на осі феромагнітну пластинку. Якщо в котушці протікає струм, що вимірюється, то створене котушкою поле втягує феромагнітну пластинку всередину. Якщо вимірюється величина в колі постійного струму, то обертальний момент пропорційний квадрату струму. Якщо в котушці протікає синусоїдний струм, то обертальний момент пропорційний квадрату діючого значення цього струму:

$$M_{об} = kI^2,$$

де k — коефіцієнт пропорційності.

Кут відхилення рухомої частини також пропорційний квадратові струму:

$$\alpha = cI^2.$$

Спеціальна форма феромагнітної пелюстки може трохи поліпшити нерівномірність. Створюють прилади, у котрих шкала нерівномірна тільки в початковій частині.

Квадратова пропорційність означає, що напрямок відхилення стрілки не залежить від напрямку струму, тобто *приладами електромагнітної системи можна вимірювати як в колах постійного, так і в колах змінного струму*.

Прилади електромагнітної системи можуть безпосередньо вимірювати значні струми (до 300 А) та напруги (до 600 В). Вимірювальний механізм амперметра на великий струм має котушку у вигляді одного витка мідної шини. Електромагнітний вольтметр на велику напругу має котушку з великою кількістю витків дроту малого перерізу з додатковими резисторами, котрі компенсують температурні похибки.

Точність електромагнітного приладу значно обмежується належністю феромагнітного осердя через явище залишкового намагнічення. Для зменшення впливу гістерезису (тобто підвищення класу точності приладу) осердя виготовляють зі спеціальних феромагнітних сплавів (наприклад, пермалоїв) із невеликою коерцитивною силою.

Такі прилади мають високий клас точності – до 0,2.

Основними *перевагами* приладів електромагнітної системи можна вважати:

а) простоту, надійність, дешевизну;

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

- б) спроможність використання в колах постійного та змінного струму;
- в) високу перевантажувальну здатність.

До *недоліків* приладів електромагнітної системи відносять:

- а) невисоку точність;
- б) невисоку чутливість;
- в) велике власне споживання електроенергії (0,5...15 Вт);
- г) обмежений частотний діапазон вимірювальних величин;
- д) нерівномірність шкали;
- е) чутливість до впливу зовнішніх магнітних полів.

Власне магнітне поле приладу дуже слабе, тому зовнішнє поле значно впливає на його показання. Для зменшення впливу зовнішнього поля вимірювальний механізм захищають сталевим екраном. Значно менше впливає зовнішнє поле на прилади електромагнітної системи з астатичним вимірювальним механізмом.

Астатичний вимірювальний механізм має дві нерухомі обмотки та два осердя на одній осі. Обмотки вмикаються послідовно у такий спосіб, що їх потоки зустрічні, а моменти, що діють на осердя, — узгоджені. В цьому разі зовнішній магнітний потік підсилює обертальний момент одного осердя і водночас послаблює момент другого осердя. Тому в астатичних електромагнітних приладах загальний обертальний момент не залежить від зовнішнього магнітного поля.

Прилади електромагнітної системи застосовуються у промислових електротехнічних пристроях низької частоти та постійного струму, а також (досить широко) як щитові амперметри і вольтметри класів 1,0; 1,5; 2,0.

15.2.3. *Прилади електродинамічної системи* мають вимірювальний механізм, що складається з двох котушок — нерухомої і рухомої. Нерухома котушка має дві секції, всередині котрих на осі розташована рухома котушка. За наявності струму у котушках виникають електромагнітні сили взаємодії, що прагнуть повернути рухома котушку, тобто обертаючий момент пропорційний (для постійних струмів і відповідної конструкції механізму) добутку струмів:

$$M_{об} = kI_1I_2.$$

Якщо прилад вмикається у коло синусоїдного струму, то обертальний момент пропорційний добутку діючих значень струму і косинусу зсуву фаз між ними:

$$M_{об} = kI_1I_2 \cos\alpha.$$

Електродинамічні прилади можна використовувати як амперметри, вольтметри та ватметри у колах постійного та змінного струмів.

Протидіючий момент створюється двома пружинами, по котрих здійснюється підведення струму до рухомої котушки. Підбираючи форми котушок та їх розташування, можна одержати майже лінійну шкалу вольтметрів і амперметрів, починаючи з 20% верхньої межі вимірювання.

Використовуючи електродинамічний прилад, котушки вмикають паралельно амперметру тому, що обмежене підведення великого струму до рухомої котушки через пружини. Обидві обмотки вмикаються через додаткові резистори.

При вимірюванні напруги обмотки вмикаються послідовно і також із додатковим резистором.

Якщо прилад використовується як ватметр, то нерухому обмотку вмикають послідовно, а рухому з додатковим резистором — паралельно до навантаження. Кут відхилення стрілки пропорційний потужності навантаження, тому шкала ватметрів електродинамічної системи завжди рівномірна. Напрямок відхилення рухомої частини залежить від відносного напрямку струму в котушках. Тому затискачі струмової обмотки і обмотки напруги, котрі вмикаються на джерело живлення, позначаються зіркою. Ці затискачі називаються ***генераторними***.

Прилади електродинамічної системи мають ***переваги*** над приладами інших систем:

- а) дуже високу точність (класи 0,1; 0,2; 0,5);
- б) можливість використання в колах постійного і змінного струму.

Висока точність цих приладів обумовлена тим, що магнітні потоки замикаються повітрям, а не у феромагнітних осердях, тобто виключається вплив та похибки явища гістерезису, вихрових струмів тощо. Тому прилади електродинамічної системи у вигляді переносних широко застосовуються в точних лабораторних дослідженнях.

Основними ***недоліками*** приладів електродинамічної системи вважають:

- а) залежність показання від впливу зовнішніх магнітних полів через слабе власне магнітне поле;
- б) слабку перевантажувальну спроможність через обмеження струмопідведення до рухомої котушки;

- в) значну споживану потужність;
- г) незначний обертальний момент.

Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів та підвищення обертового моменту в приладах *феродинамічної системи* застосовується феромагнітне осердя. Нерухома котушка цих приладів розташована на сталевому магнітопроводі. Прилад створює потужний магнітний потік, що захищає його від впливу зовнішніх полів і підвищує обертальний момент.

Вимірювальні прилади феродинамічної системи мають порівняно низьку точність вимірювання і обмежений діапазон частот. Прилади цієї системи використовують в основному як щитові в колах змінного струму. Великий обертальний момент дає змогу використовувати феродинамічні системи в самописних приладах у колах з частотою від 10 до 1500 Гц.

15.2.4. Принципово прилади *індукційної системи* можна зробити будь-якого призначення (амперметри, вольтметри, ватметри тощо). Але найбільшого розповсюдження *набули індукційні лічильники електричної енергії*.

Індукційний лічильник — це маленький двигун змінного струму. Принцип дії ґрунтується на взаємодії обертового (або біжучого) магнітного поля з вихровими струмами у рухомій частині приладу.

Біжуче поле створюється двома магнітними потоками, що зсунуті на деякий кут за фазою. Ці потоки створюються двома електромагнітами. Обмотка одного електромагніту (з великою кількістю витків) увімкнена паралельно навантаженню. Обмотка другого має малу кількість витків і вмикається послідовно щодо навантаження, тобто один потік пропорційний напрузі, а другий — струму навантаження. Створюється обертальний момент, пропорційний потужності змінного струму:

$$M_{об} = kP.$$

Протидіючий момент створюється сталим магнітом, в полі котрого обертається рухома частина — алюмінієвий диск. Взаємодія сталого магнітного потоку з вихровими струмами зумовлює гальмівний момент $M_{г}$. При сталій частоті обертання —

$$M_{об} = M_{г},$$

а

$$W = cn,$$

8 4-16

де W — енергія, що споживається навантаженням;

n — кількість обертів лічильника;

c — сталий коефіцієнт (стала лічильника показує кількість кіловат-годин електроенергії, що відповідає одному обертю диска).

Перевагами приладів індукційної системи можна вважати:

- а) порівняно великий обертальний момент;
- б) стійкість до значних перевантажень (по струму до 300%);
- в) незалежність від зовнішніх магнітних полів.

Варто відзначити, що лічильники індукційної системи використовують для змінного струму лише однієї частоти. Показання приладів цієї системи залежать значною мірою від температури навколишнього середовища.

Взагалі лічильники індукційної системи дуже надійні в експлуатації. Вони випускаються промисловістю класів 1,0; 2,0; 2,5 (лічильники активної енергії) і 2,0; 3,0 (лічильники реактивної енергії). Бувають лічильники однофазні і трифазні.

Для розширення меж вимірювання енергії змінного струму за напругою і струмом використовують вимірювальні трансформатори напруги і струму.

15.2.5. Вимірювальний механізм приладу **електростатичної системи** складається з металевих ізольованих пластин. Під дією потенціалу рухома пластина відхиляється, тобто створюється обертальний момент —

$$M_{об} = cU^2,$$

пропорційний квадрату постійної напруги або квадрату діючого значення синусоїдної напруги.

Підбиранням форми і розмірів пластин можна отримати рівномірну шкалу.

Прилади електростатичної системи використовуються тільки як вольтметри постійної і змінної напруги.

До **переваг** електростатичних вольтметрів можна віднести:

- а) мале власне споживання електричної енергії;
- б) нечутливість до зовнішніх магнітних полів та коливань температури;
- в) можливість вимірювати високі напруги без застосування вимірювальних трансформаторів напруги.

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

До *недоліків* приладів цієї системи можна віднести порівняно низьку чутливість приладів.

Для розширення меж вимірювання електростатичними вольтметрами застосовують ємнісні та резисторні поділювачі напруги.

15.2.6. *Цифрові прилади* вимірюють значення безперервної електричної величини в окремі моменти часу. Результат вимірювання подається в цифровій формі.

Промисловість виготовляє цифрові вольтметри постійної напруги від 1 мкВ до 1000 В. Завдяки застосуванню каліброваних шунтів ці прилади можна використовувати як цифрові амперметри до 7500 А, крім того, як вольтметри змінної напруги, частотоміри, омметри тощо.

Ці прилади мають дуже велику точність вимірювання (похибки від 0,1 до 1%), велику швидкодію, широкі межі вимірювань. Цифрові прилади можна комутувати з обчислювальними машинами.

До *недоліків* цифрових приладів треба віднести їх високу вартість та порівняну складність.

15.3. Вимірювання струмів, напруг, потужностей та енергії

15.3.1. *Для вимірювання струму* будь-якої вітки електричного кола амперметр вмикають послідовно з елементами кола. В колах постійного струму застосовуються прилади магнітоелектричної системи і нечасто — електромагнітної системи. Для зменшення похибки вимірювання треба, щоб опір амперметра був значно меншим (на два порядки) за опір елемента вітки, в котрій вимірюється струм.

Для вимірювання напруги вольтметр вмикають паралельно до елемента, напругу на якому треба визначити. В колах постійного струму користуються приладами магнітоелектричної системи. Для зменшення похибки вимірювання опір вольтметра повинен бути великим (на два порядки більшим за опір елемента, на якому вимірюється напруга).

Потужність у колі постійного струму обчислюється за показами амперметра і вольтметра:

$$P = UI.$$

У випадках, коли немає змоги виміряти водночас напругу і струм, вимірюють потужність електродинамічним ватметром.

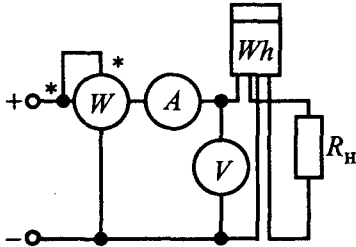


Рис. 15.1

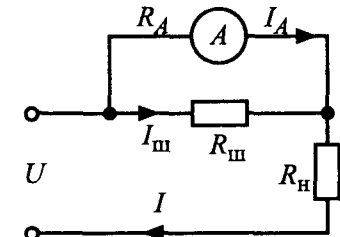


Рис. 15.2

Енергію в колах постійного струму вимірюють електродинамічним лічильником. Схему вмикання вимірювальних приладів в коло постійного струму наведено на рис. 15.1.

15.3.2. Для розширення меж вимірювання амперметром використовують шунти (рис. 15.2). Якщо I_A — максимальний допустимий струм амперметра, то можна записати:

$$I_A R_A = I_{ш} R_{ш},$$

$$I_{ш} = \frac{I_A R_A}{R_{ш}}.$$

За першим законом Кірхгофа —

$$I = I_A + I_{ш},$$

тобто

$$\frac{I}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}.$$

Відношення $n = \frac{I}{I_A}$ називається коефіцієнтом розширення меж вимірювання амперметром. У цьому разі можна визначити опір шунта, котрий забезпечує розширення меж із коефіцієнтом n :

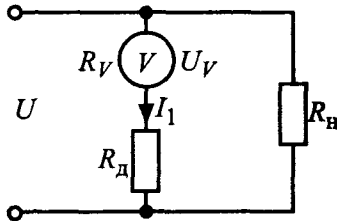


Рис. 15.3

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}.$$

Для розширення меж вимірювання вольтметра використовують додаткові опори, котрі вмикаються послідовно з обмоткою вольтметра (рис. 15.3).

Якщо U_V — максимально допустима напруга вольтметра, то

$$U = I_1 R_V + I_1 R_{д}.$$

Величина $m = \frac{U}{U_V}$ — коефіцієнт розширення меж вимірювання

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання
вольтметром. Тоді

$$m = \frac{I_1}{U_V} (R_V + R_d).$$

Оскільки $\frac{U_V}{I_1} = R_V$, можна визначити величину додаткового опору, котрий забезпечує розширення меж вимірювання вольтметра:

$$R_d = R_V (m - 1).$$

15.3.3. У колах однофазного синусоїдного струму, як правило, напругу і струм визначають за допомогою електромагнітних приладів, активну потужність вимірюють однофазним електромагнітним ватметром, а електричну енергію — однофазним індукційним лічильником активної енергії. Схему вмикання приладів наведено на рис. 15.4.

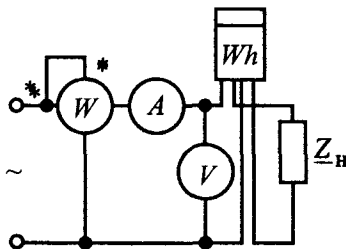


Рис. 15.4

У колах змінного струму для розширення меж вимірювання застосовують вимірювальні трансформатори. Первинна обмотка трансформатора струму вмикається послідовно у вітку, де вимірюється струм. На вторинну обмотку вмикаються амперметр та струмові котушки інших вимірювальних приладів. Для безпечного вимірювання вторинна обмотка обов'язково заземлюється. Первинна обмотка трансформатора струму має невелику кількість витків, а при струмі понад 600 А — лише один виток. Вторинна обмотка усіх промислових трансформаторів струмів розрахована на 5 А. Межі вимірювання амперметра розширюються у k разів (k — коефіцієнт трансформації трансформатора струму).

Первинна обмотка трансформатора напруги вмикається паралельно до елемента, на якому вимірюється напруга. На вторинну обмотку вмикається вольтметр та обмотки напруги інших вимірювальних приладів. Для безпечного вимірювання вторинна обмотка обов'язково заземлюється. Трансформатор напруги розширює межі вимірювання також в k разів (k — коефіцієнт трансформації трансформатора напруги).

Промисловістю випускаються трифазні і однофазні трансформатори напруги. Це знижувальні трансформатори, у котрих вторинна напруга дорівнює 100 В.

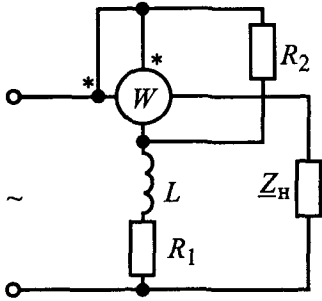


Рис. 15.5

Реактивна потужність у колах однофазного синусоїдного струму вимірюється варметрами (рис. 15.5). Резистори R_1, R_2 та індуктивність L штучно зсовують у котушці напруги струм на 90° щодо напруги. В цьому разі обертальний момент буде пропорційний до $\sin\varphi$:

$$M_{об} = k_1 UI \sin \varphi,$$

тобто кут відхилення рухомої частини пропорційний до реактивної потужності:

$$\alpha = k_2 Q.$$

15.3.4. У колах трифазного синусоїдного струму при симетричному навантаженні потужність вимірюють в одній фазі одним ватметром. Загальна активна потужність трифазного кола —

$$P = 3P_\phi.$$

На рис. 15.6 наведено схему вмикання ватметра в симетричне коло при з'єднанні навантаження зіркою і трикутником.

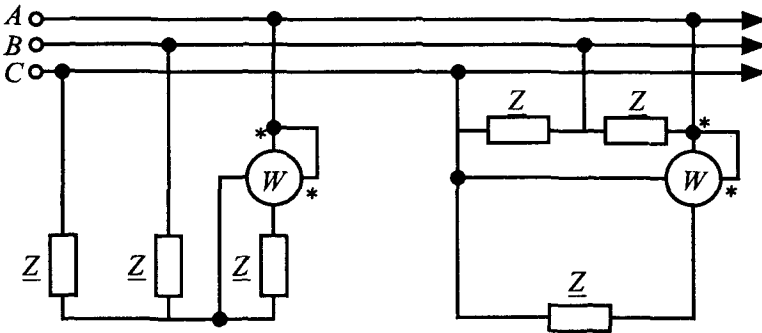


Рис. 15.6

У випадку, коли симетричний приймач конструктивно не дає доступу до нейтральної точки, використовують схему зі штучною нейтральною точкою (рис. 15.7). Додаткові резистори вибирають

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

у такий спосіб, що

$$R_A + R_V = R_B = R_C,$$

де R_V — активний опір обмотки напруги електродинамічного ватметра.

Вимірювання активної енергії у трифазних симетричних колах проводять за такими ж схемами однофазними лічильниками електричної енергії. Загальна енергія системи у три рази більша за фазну.

Активну потужність *при несиметричному навантаженні* у трипровідній схемі вимірюють за допомогою трьох або двох ватметрів. При використанні трьох ватметрів загальна потужність системи дорівнює сумі фазних (рис. 15.8).

На рис. 15.9 наведено схему вимірювання потужності трипровідної несиметричної системи за допомогою двох ватметрів. Загальна потужність у цьому разі дорівнює сумі показань ватметрів.

У чотирипровідній схемі вимірювання потужності проводять трьома однофазними (рис. 15.10) або одним трифазним ватметром з трьома послідовними обмотками (рис. 15.11).

При симетричному навантаженні реактивну потужність можна виміряти одним ватметром, що вмикається за схемою, наведеною на рис. 15.12. Струмova обмотка вмикається в лінійний провід, а обмотка напруги — на лінійну напругу, тобто прилад показуватиме потужність $U_{\Delta} I_{\Delta} \sin \phi$. Для визначення реактивної потужності системи показання ватметра треба помножити на $\sqrt{3}$.

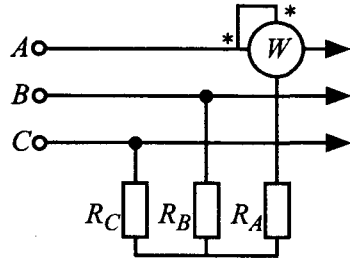


Рис. 15.7

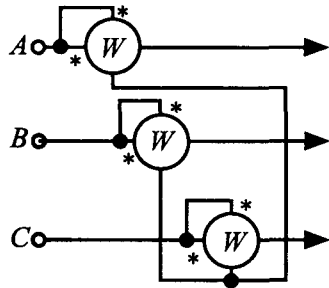


Рис. 15.8

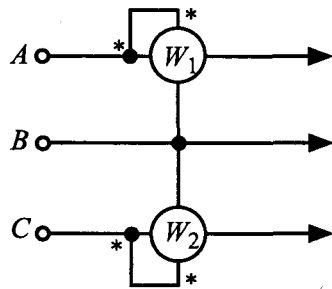


Рис. 15.9

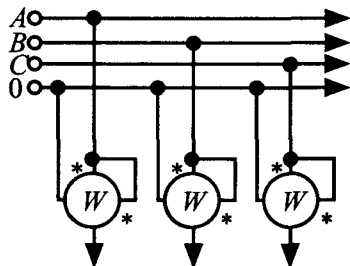


Рис. 15.10

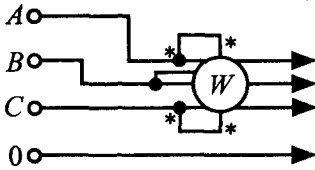


Рис. 15.11

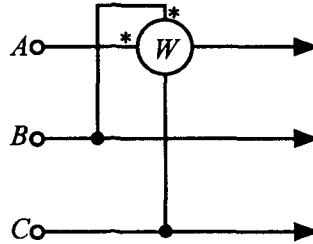


Рис. 15.12

Реактивну потужність можна визначити також методом двох ватметрів (рис. 15.9). У цьому разі треба взяти різницю показників двох ватметрів та помножити на $\sqrt{3}$.

Взагалі для вимірювання реактивної потужності використовують ті ж схеми, що й для вимірювання активної потужності. Тільки в цьому разі треба користуватися приладами для вимірювання реактивної потужності — варметрами.

15.4. Вимірювання коефіцієнта потужності, послідовності чергування та зсуву фаз, частоти

15.4.1. В однофазних колах синусоїдного струму *коефіцієнт потужності* можна визначити за вимірними напругою, струмом та активною потужністю:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Таким же чином за вимірними величинами можна визначити коефіцієнт потужності у трифазному колі при симетричному навантаженні:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}}.$$

Якщо у трифазному симетричному колі виміряна активна і реактивна потужність, то коефіцієнт потужності можна визначити за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}.$$

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

Коефіцієнт потужності для симетричного навантаження можна знайти при вимірюваннях двома ватметрами (рис. 15.9)

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1},$$

за котрим визначають $\cos \varphi$.

Середньозважений коефіцієнт потужності за певний період часу можна обчислити вимірюванням активної і реактивної енергії:

$$\cos \varphi_{\text{сеп}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_p}{W_a}\right)^2}}.$$

Коефіцієнт потужності можна виміряти безпосередньо трифазним феродинамічним фазометром. Вимірювальний механізм фазометра — це логометр із двома рухомими котушками на спільній осі. Кут повороту стрілки залежить від зсуву фази між струмом і напругою. На рис. 15.13 наведено схему увімкнення трифазного фазометра. Цей фазометр треба вмикати в електричне коло з контролем правильності чергування фаз.

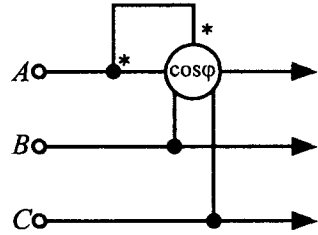


Рис. 15.13

15.4.2. **Зсув фаз** також безпосередньо вимірюється фазометром. Шкала фазометра градується в значеннях кута φ або $\cos \varphi$.

Промисловість виготовляє одно- і трифазні фазометри електродинамічної системи.

Для вимірювання зсуву фаз використовують також електронні фазометри. Електронні фазометри вимірюють проміжок часу між моментом переходу через нуль двох синусоїдних величин. Точність електронних фазометрів досить висока. Так, фазометр Ф2-1, що працює в діапазоні частот від 20 до 100 кГц, має похибку $\pm (1 + 0,1\varphi_n)^0$, де φ_n — межове значення вимірювання.

Цифровий фазометр Ф2-16 працює в діапазоні частот 20 Гц...2 МГц ще з більшою точністю.

Зсув фаз між двома напругами можна виміряти за допомогою електронно-променевого осцилографа методом еліпса. Одна синусоїдна напруга подається на вертикальний, а друга — на горизонтальний канали осцилографа. Сигнали створюють на екрані еліпс. Вимірюються геометричні параметри еліпса і знаходиться зсув фази —

$$\varphi = 2\arctg A/a,$$

де A — велика вісь еліпса,
 a — мала вісь еліпса.

При вимірюванні зсуву фаз осцилографом похибка складає 5...10%.

15.4.3. Промисловість випускає феродинамічні фазовказівники — прилади для *визначення послідовності чергування фаз*. Три фази приєднуються до затискачів приладу. Відповідне відхилення стрілки (позитивне чи негативне) показує пряме або обернене чергування фаз.

15.4.4. Велике значення має *вимірювання частоти синусоїдної величини*. Для вимірювання низьких частот (до 2 кГц) застосовують електромагнітні та електродинамічні частотоміри. Принцип дії частотоміра ґрунтується на зміні індуктивного опору в залежності від частоти струму. Шкала таких приладів градується у значеннях частоти мережі.

Для вимірювання високих частот використовуються аналогові електронні і цифрові частотоміри.

Цифрові електронно-лічильні частотоміри мають велику точність і працюють в діапазоні частот 0,01 Гц...12 МГц. Похибка вимірювання частоти складається з похибки частоти кварцевого генератора ± 1 одиниця рахунку.

Резонансні частотоміри застосовуються головним чином у радіотехніці. Ці прилади вимірюють частоту в межах 125 кГц...70 ГГц, мають високу надійність і просту конструкцію. Принцип дії полягає в настроюванні коливального контуру в резонанс із вимірюваним сигналом. Резонансні частотоміри мають похибку вимірювання 0,05...0,1%.

Із точністю 5...10% частоту можна виміряти осцилографом за фігурами Ліссажу. На один канал осцилографа подається сигнал, частота якого вимірюється, а на другий — напруга відомої частоти. На екрані осцилографа викреслюється фігура Ліссажу, котра буде нерухома при кратному відношенні частот.

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

15.5. Вимірювання параметрів електричного кола

15.5.1. *Електричний опір* вимірюють кількома способами і найпростішим є метод амперметра-вольтметра. При вимірюванні опору за схемою, наведеною на рис. 15.14,

$$R = \frac{U}{I}$$

Вимірюваний опір R_B відрізняється від дійсного R

$$R_B = R + R_A,$$

тобто внутрішній опір амперметра R_A вносить похибку вимірювання. Тому така схема застосовується при вимірюванні досить великих опорів ($R \gg R_A$). Внутрішній опір амперметра повинен бути не менше, ніж на два порядки нижчим за вимірюваний.

Для вимірювання малих опорів застосовують схему, наведену на рис. 15.15. В цьому разі невідомий опір можна визначити:

$$R_B = \frac{R}{1 + \frac{R}{R_V}}$$

Ця схема використовується, коли вимірюваний опір не менше, ніж на два порядки нижчий за внутрішній опір вольтметра.

Безпосередньо опір вимірюють омметром, котрий має набір додаткових резисторів та джерело живлення. Прилад працює за принципом вимірювання струму при постійній ЕРС. Шкала градується в одиницях опору. Омметри мають велику похибку (клас точності 2,5) і нерівномірну (обернену) шкалу.

Точнішим є мостовий метод вимірювання опорів. Резистор R , опір якого вимірюється, вмикають у плече моста, опори R_1, R_2 і R_3 — відомі (рис. 15.16). У діагональ ab вмикають

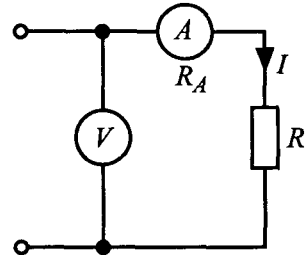


Рис. 15.14

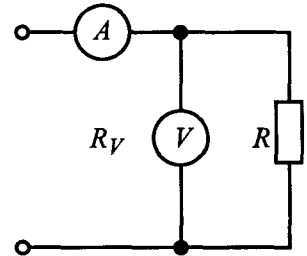


Рис. 15.15

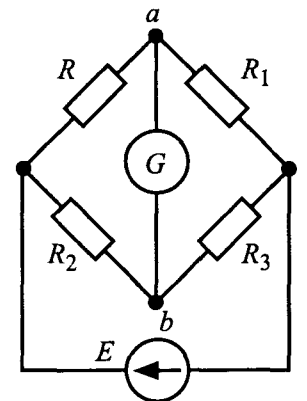


Рис. 15.16

магнітоелектричний гальванометр. Гальванометр показує відсутність струму, коли

$$RR_3 = R_1R_2,$$

тобто невідомий опір можна визначити

$$R = \frac{R_1R_2}{R_3}.$$

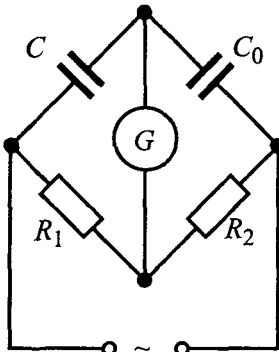


Рис. 15.17

Є кілька різновидів мостів, що вимірюють опори з різною точністю. Мости мають кілька діапазонів і вимірюють опори в межах 0,01 Ом ... 10 МОм.

Для вимірювання великих опорів (наприклад, опору ізоляції дротів) застосовують мегаомметри. Мегаомметр — це магнітоелектричний логометр із генератором постійного струму ручного приводу. При частоті обертання 90...150 об/хв генерується напруга 100, 500, 1000 або 2500 В. Мегаомметр дає змогу не тільки виміряти опір ізоляції, а й перевірити її електричну міцність. Опір ізоляції електричних кіл напругою до 1000 В повинен бути не меншим за 0,5 МОм.

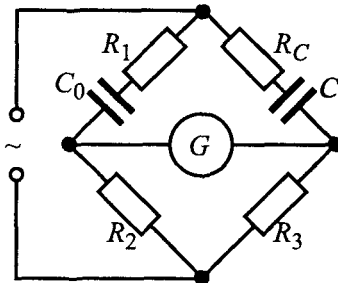


Рис. 15.18

15.5.2. Міст змінного струму використовують для **вимірювання ємності**. Якщо не враховувати втрати в конденсаторі, можна вимірювання проводити за схемою, наведеною на рис. 15.17. Вимірювана ємність визначається за умовою рівноваги моста:

$$C = C_0 \frac{R_2}{R_1}.$$

Якщо враховувати опір конденсатора (R_C), можна використати схему послідовного заміщення конденсатора (рис. 15.18). Рівновага моста забезпечується при

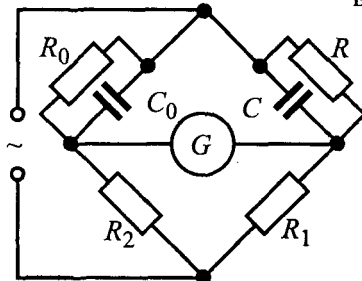


Рис. 15.19

$$C = C_0 \frac{R_2}{R_3}.$$

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

Можна визначити *опір конденсатора та добротність*:

$$R_C = \frac{R_1 R_3}{R_2}, \quad Q = \frac{1}{\omega C_0 R_1}.$$

Для конденсатора зі значними втратами вимірювання проводять за схемою, наведеною на рис. 15.19. З умов рівноваги моста —

$$C = C_0 \frac{R_2}{R_1}, \quad Q = \omega C_0 R_0.$$

Мости змінного струму мають багато діапазонів вимірювання і клас точності до 0,01.

15.5.3. За мостовою схемою проводять також *вимірювання індуктивності*. На рис. 15.20 наведено схему моста змінного струму для вимірювання індуктивності та *активного опору котушки*. За умовою рівноваги моста визначають:

$$L = C_0 R_1 R_2,$$

$$R_L = \frac{R_1 R_2}{R_0}.$$

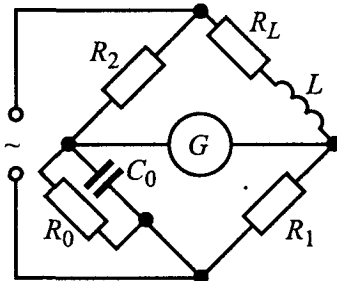


Рис. 15.20

15.6. Похибки вимірювання та приладів

15.6.1. Показання будь-яких приладів завжди до якоїсь міри відрізняються від дійсних значень вимірюваної величини. Це пов'язано з недосконалістю вимірювальних приладів, методів вимірювання, впливом зовнішніх чинників (зовнішні магнітні та електричні поля, зміна температури, вологості тощо). Тому при вимірюванні необхідно, крім значення величини, визначити також похибку вимірювання. Тобто треба знати точність, з якою проведено вимірювання, відхилення від дійсного значення вимірюваної величини.

За *дійсне значення величини* приймають значення, виміряне за допомогою еталонних (зразкових) приладів.

Для характеристики точності приладів і вимірювання вводять поняття похибки.

Похибки можна класифікувати:

- а) за способом виразу похибки засобів і методів вимірювання (абсолютні, відносні, зведені);
- б) за характером прояву (систематичні, випадкові, похибки оператора);
- в) за умовами експлуатації (основні похибки і додаткові).

15.6.2. Похибку можна визначити в абсолютних або відносних величинах.

Абсолютна похибка — це різниця між вимірним та дійсним значенням величини:

$$\Delta A = A_B - A,$$

де A_B — показання приладу (виміряна величина),
 A — дійсна величина.

Абсолютна похибка, що береться з оберненим знаком, називається **поправкою**, тобто:

$$\Delta P = -\Delta A,$$

а дійсне значення вимірюваної величини

$$A = A_B + \Delta P.$$

Поправки в абсолютних значеннях наводяться в технічному паспорті електровимірювального приладу.

Точність вимірювання характеризується **відотною похибкою** — відношенням абсолютної похибки до дійсного значення величини у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} 100.$$

Абсолютна і відносна похибки характеризують точність вимірювання і не характеризують вимірювальний прилад. Для характеристики точності електровимірювального приладу вводять поняття **зведеної похибки**, як абсолютну похибку у відсотках від номінальної величини приладу:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_H} 100 = \frac{A_B - A}{A_H} 100,$$

15. Електровимірвальні прилади та електровимірювання

де A_n — номінальне значення (максимальне значення шкали приладу).

Зведена похибка визначає клас точності вимірвального приладу. Наприклад, якщо клас точності приладу дорівнює 0,5, то найбільша зведена похибка складає $\gamma = \pm 0,5\%$.

Варто розглянути кілька прикладів розрахунків похибок.

□ **Приклад 1.** Виміряне значення струму $I_b = 26$ А, дійсне значення $I = 25$ А. Визначити абсолютну і відносну похибки.

Абсолютна похибка:

$$\Delta I = 26 - 25 = 1 \text{ А,}$$

відносна похибка:

$$\delta = \frac{1}{25} \cdot 100 = 4\%.$$

□ **Приклад 2.** Амперметром класу 1,5 з межовим значенням шкали 10 А виміряно струм $I_b = 2$ А. Визначити абсолютну і відносну похибки.

Абсолютна похибка:

$$\Delta I = \frac{\gamma I_n}{100} = \frac{1,5 \cdot 10}{100} = 0,15 \text{ А.}$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100 = \frac{0,15}{2 \pm 0,15} \cdot 100 = (6,98 \dots 8,11)\%.$$

□ **Приклад 3.** Тим же приладом виміряно струм $I_b = 9$ А. Визначити абсолютну і відносну похибку.

Абсолютна похибка: $\Delta I = 0,15$ А.

Дійсне значення:

$$I = I_b \pm \Delta I = (9 \pm 0,15) \text{ А.}$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100 = \frac{0,15}{9 \pm 0,15} \cdot 100 = (1,64 \dots 1,69)\%.$$

Відносна похибка, як видно з прикладів, зростає при зменшенні значення вимірвальної величини. Треба знати, що для підвищення точності вимірювань необхідно користуватися другою половиною шкали.

Часто при визначенні похибок із великою точністю можна за дійсне значення приймати виміряне значення.

Чутливістю приладу називають відношення переміщення стрілки до вимірюваної величини

$$S = \frac{n}{A_B},$$

де n — відхилення стрілки в поділках.

Обернена величина —

$$C = \frac{1}{S} = \frac{A_B}{n}$$

називається **сталюю приладу або ціною поділки**.

Ціну поділки також можна визначити:

$$C = \frac{A_H}{n_H},$$

де n_H — число поділок шкали.

□ **Приклад 4.** Амперметр має клас точності 0,2, число поділок шкали $n_H = 100$ і межу вимірювання $I_H = 5$ А. При вимірюванні стрілка приладу відхилилася на $n = 76$ поділок. Визначити ціну поділки, абсолютну та відносну похибку, значення струму.

Ціна поділки амперметра:

$$C = \frac{I_H}{n_H} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А/под.}$$

Виміряний струм:

$$I_B = Cn = 0,05 \cdot 76 = 3,8 \text{ А.}$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta I = \gamma \frac{I_H}{100} = \frac{0,2 \cdot 5}{100} = 0,01 \text{ А.}$$

Відносна похибка:

$$\delta \approx \frac{\Delta I}{I_B} \cdot 100 = \frac{0,01}{3,8} \cdot 100 = 0,26\%.$$

15. Електровимірювальні прилади та електровимірювання

15.6.3. Абсолютна похибка за характером прояву визначається складовими:

- а) систематична похибка;
- б) випадкова похибка;
- в) похибка оператора.

Систематична похибка зумовлена чинниками, які можна врахувати. Це може бути недосконалість вимірювального приладу, вплив зовнішніх умов (радіація, вологість, температура тощо), загальна недосконалість вимірювання (методична похибка) тощо. Систематична похибка залишається сталою або змінюється за визначеним законом. Отже, систематичну похибку можна врахувати за допомогою відповідних поправок.

Випадкова похибка виникає внаслідок окремих випадкових чинників, що не підлягають безпосередньому врахуванню. Випадкова похибка змінюється за випадковим законом. Її не можна визначити дослідним шляхом. Оцінку випадкових похибок можна зробити методом теорії імовірності при великій кількості повторюваних вимірювань.

Похибка оператора виникає через помилковий запис, неправильне визначення ціни поділки приладу. Ця похибка значно відрізняє загальні результати вимірювань. Ці результати просто виключають при обробці експерименту.

15.6.4. В залежності від умов експлуатації розрізняють **основні та додаткові похибки**.

Основною похибкою вважають похибку засобів вимірювання за нормальних умов експлуатації (відповідно до даних, наведених у паспорті приладу і на шкалі).

Нормальними кліматичними умовами вважають:

- температуру навколишнього середовища (20 ± 5), °C;
- відносну вологість повітря (65 ± 15), %;
- тиск (750 ± 30), мм рт. ст.

Робочими кліматичними умовами вважають дійсні параметри навколишнього середовища, при котрих працює прилад.

Додатковою похибкою називають похибку засобів вимірювання, що виникає при відхиленні від нормальних кліматичних умов.

16. ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ТЕХНІКИ

16.1. Основні положення

16.1.1. На початку ХХ ст. були відкриті підсилювальні властивості напівпровідникових конструкцій та розпочато вивчення і використання напівпровідникової техніки. Напівпровідники посідають проміжне місце між металами (провідниками) та діелектриками (ізоляторами). До напівпровідників належать матеріали з питомим опором $10^8 \dots 10^{-6}$ Ом·м. Це хімічні елементи — кремній (Si), германій (Ge), а також оксиди (Cu_2O , ZnO та інші). Широко використовуються кремній та германій.

16.1.2. Атом кремнію на зовнішній орбіті має чотири валентних електрони, що зв'язані з чотирма електронами інших атомів кремнію. Цей ідеальний кристал кремнію не проводить електричний струм, оскільки не має вільних носіїв заряду.

16.1.3. Кристал кремнію можна зробити провідним додаванням домішок інших хімічних елементів із сусідніх груп. Використовуються елементи п'ятої групи (сурма, фосфор) або елементи третьої групи (галій, індій). Якщо використати фосфор, що має п'ять електронів на зовнішній орбіті, то кожний атом фосфору матиме один вільний електрон. Тобто матеріал буде мати *електронну провідність*, або *електропровідність n-типу*.

16.1.4. Якщо взяти домішку з елементів третьої групи, то напівпровідник буде мати *діркову провідність*, або *електропровідність p-типу*.

Домішки, що віддають початковому матеріалу електрони, називаються *донорами*. Якщо домішки призводять до виникнення дірок, вони називаються *акцепторами*.

Робота напівпровідникових приладів ґрунтується на властивостях р-n-переходу, тобто границі між р-провідністю і n-провідністю.

16.2. Напівпровідникові діоди

16.2.1. Напівпровідниковий діод має один р-п-перехід та два виводи (електроди). Робота діодів ґрунтується на одnobічній провідності р-п-переходу. Звичайно діоди мають герметичні корпуси, що сприяють відведенню тепла.

16.2.2. Напівпровідникові діоди класифікуються за різними ознаками:

- а) типом конструкції переходу (точкові, площинні);
- б) функціональними ознаками (випрямні, імпульсні, детекторні, перетворювальні тощо);
- в) основним матеріалом (германієві, кремнієві);
- г) фізичними процесами (лавинно-пролітні, тунельні, фотодіоди, світлодіоди та інші);
- д) граничними технічними параметрами (малострумні, середньої потужності, великої потужності, низькочастотні та інші).

16.2.3. На рис.16.1 наведено умовне позначення діода. Прямий струм спрямований від анода до катода. **Пряме увімкнення діода** (коли на анод подається позитивний заряд джерела живлення) **характеризується дуже малим опором р-п-переходу. Зворотне увімкнення характеризується великим опором переходу.**

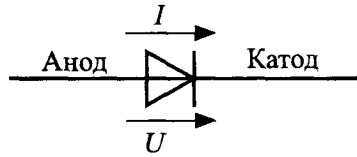


Рис. 16.1

16.2.4. Вольт-амперна характеристика діода (рис. 16.2) показує, що при зворотному увімкненні можливий пробій. Визначають крутість вольт-амперної характеристики при прямому увімкненні:

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta U}.$$

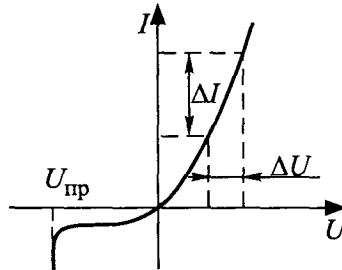


Рис. 16.2

16.3. Тиристори

16.3.1. Тиристор — це напівпровідниковий прилад із двома стійкими станами. У простішому випадку тиристор має три р-п-переходи. Тиристор перемикається із закритого стану у відкритий (тиро — відчинено).

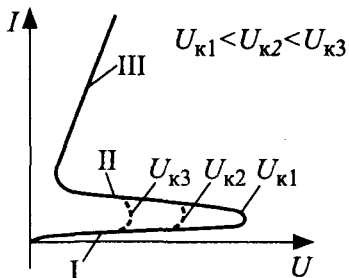


Рис. 16.3

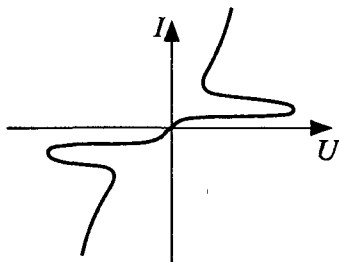


Рис. 16.4

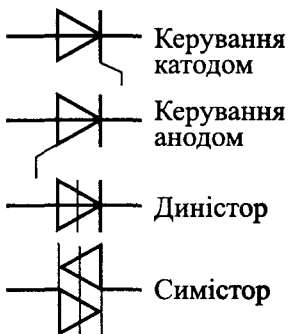


Рис. 16.5

Тиристор — це високострумний прилад із номінальними значеннями струму у відкритому стані до 5000 А. Номінальні значення напруги у закритому стані сягають 5000 В. Тиристри мають велику швидкодію ($\tau_{\text{вм}} \approx 0,01$ мкс). ККД тиристора сягає 0,9 і більше.

16.3.2. Розрізняють керовані та некеровані (диністри, або діодні) тиристри. Керовані тиристри мають три електроди (анод, катод, керуючий електрод).

16.3.3. Вольт-амперна характеристика тиристора (рис. 16.3) має три ділянки:

I ділянка — тиристор зачинений;

II ділянка — нестійкий режим роботи;

III ділянка — тиристор відчинений.

Застосовуються також симістри — симетричні тиристри. Вольт-амперна характеристика симістора наведена на рис. 16.4. Вони застосовуються у колах змінного струму.

На рис. 16.5 наведені стандартні позначення тиристорів.

16.4. Вторинні джерела електроживлення

16.4.1. Окремі споживачі (радіоелектронні пристрої, пристрої керування та інші) одержують електроенергію не від основних (первинних), а від вторинних джерел електроживлення. **Вторинні джерела електроживлення перетворюють рід струму та величину напруги.**

16.4.2. За призначенням вторинні джерела електроживлення класифікуються у такий спосіб:

16. Основи напівпровідникової техніки

- перетворювачі змінної напруги (трансформатори);
- перетворювачі постійної напруги у змінну;
- перетворювачі постійної напруги однієї величини у постійну напругу іншої величини;
- перетворювачі змінної напруги у постійну — трансформаторно-випрямні блоки.

16.4.3. За принципом дії вторинні джерела бувають:

- електромеханічні (динамічні);
- магнітонапівпровідникові (статичні).

Прикладом електромагнітного перетворювача є авіаційний двигун — генераторний перетворювач постійної напруги 27 В у змінну напругу 36 В, 400 Гц. Він складається з двигуна постійного струму та трифазного генератора, котрі зібрані у спільному корпусі (рис. 16.6).

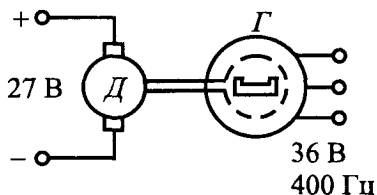


Рис. 16.6

16.4.4. Типовим вторинним джерелом електроживлення є трансформаторно-випрямний блок. Він складається із:

- силового трансформатора;
- випрямляча;
- згладжуючого фільтра;
- стабілізатора напруги.

Силовий трансформатор змінює напругу мережі до потрібної напруги, а також створює електричне роз'єднання кола вторинного електроживлення від мережі.

Випрямні пристрої перетворюють синусоїдну напругу на постійну. Ця напруга має пульсації, що згладжуються фільтрами. Зазвичай застосовують стабілізатор напруги, що забезпечує постійну напругу на навантаженні.

16.5. Випрямлячі

16.5.1. Випрямні пристрої бувають:

- некеровані (на діодах);
- керовані (на тиристорах).

Однопівперіодний випрямляч має один напівпровідниковий діод. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то середнє значення напруги (постійна складова):

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt \approx 0,32 U_m.$$

Діюче значення струму у два рази менше, ніж максимальне, тобто:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{2}.$$

Активна потужність у навантаженні:

$$P = R_H I^2 = \frac{U_m I_m}{4}.$$

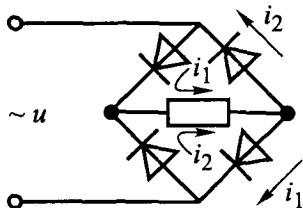


Рис. 16.7

16.5.2. Ефективнішою є **мостова схема** двопівперіодного випрямляча (рис. 16.7).

У першу половину періоду через два діоди тече струм I_1 , а два інші — зачинені. У другу половину періоду струм I_2 протікає через інші два діоди, а перші — зачинені. У резисторі протікає струм тільки в одному напрямку. Діюче значення струму:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Ця схема дуже ефективна, але гірше працює за малих напруг.

16.5.3. **Багатофазні випрямлячі** дають змогу значно зменшити пульсації випрямленої напруги на резисторі (рис. 16.8).

У кожний момент часу струм проводить тільки той діод, що увімкнений в обмотку, напруга котрої додатна. Тому крива випрямленої напруги збігається з обвідною додатних півхвиль напруг вторинних обмоток.

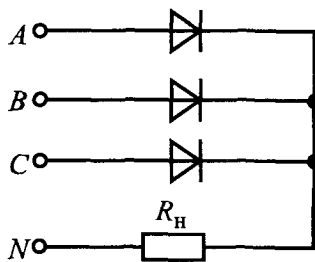


Рис. 16.8

Схему випрямляча з подвоєнням напруги наведено на рис. 16.9. У позитивні півперіоди струм протікає від клем *1* через діод *D*₁ та конденсатор *C*₁ до клем *2*. При цьому конденсатор *C*₁ заряджається. У негативні півперіоди струм проходить від клем *2* через конденсатор *C*₂, діод *D*₂ на клему *1* (пунктирні стрілки). Конденсатор *C*₂ також заряджається. Опір навантаження великий, тому конденсатори не встигають розрядитися через нього за час, що дорівнює півперіоду. А оскільки *C*₁ та *C*₂ увімкнені послідовно, навантаження увесь час знаходиться під напругою, що дорівнює подвійній амплітуді. Різновиди цієї схеми дають змогу збільшити напругу у три, чотири та більше разів.

16.5.4. У керуваному однопівперіодному тиристорному випрямлячі (рис. 16.10) у кожний позитивний півперіод на керуючий електрод подаються імпульси напругою *U*_к (рис. 16.11). Ці імпульси суворо синхронізовані з частотою напруги джерела живлення, тобто $T = 2\pi/\omega$. Змінюючи Δt , можна з великим ККД (0,95...0,99) створювати перетворення напруги.

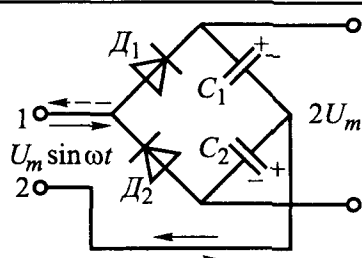


Рис. 16.9

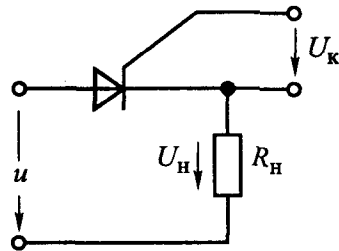


Рис. 16.10

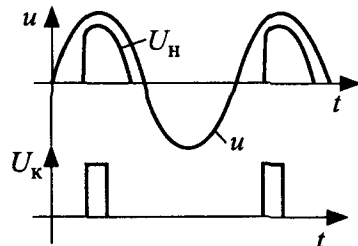


Рис. 16.11

16.6. Згладжуючі фільтри

16.6.1. Випрямлену напругу ще не можна використовувати для живлення приладів, тому є наявною велика кількість пульсацій (періодичні коливання напруги біля якогось постійного значення). Схему випрямляча доповнюють фільтром, що згладжує пульсації. Фільтри складаються з реактивних елементів (індуктивностей та ємностей), які мають малий активний опір.

16.6.2. Як правило, *попередньо з навантаженням умикають індуктивність*, що є малим опором щодо постійної складової та великим — щодо змінної:

$$X_L = \omega L.$$

Паралельно з навантаженням умикають ємність, що є нескінченно великим опором щодо постійної складової та малим — щодо змінної:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

У такий спосіб змінні складові, що замикаються через ємність, не призводять до падіння напруги на навантаженні.

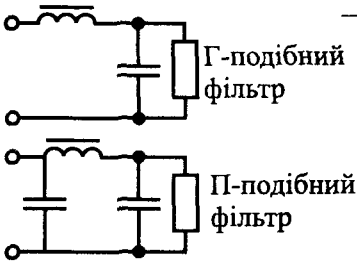


Рис. 16.12

16.6.3. Згладжуючі фільтри бувають різних конфігурацій та багатоланковими (рис. 16.12).

16.7. Стабілізатори

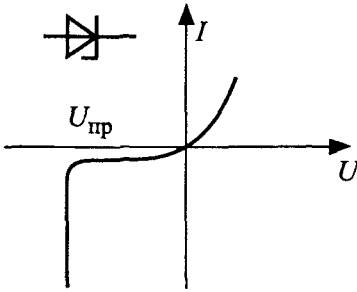


Рис. 16.13

16.7.1. Для стабілізації напруги використовують ліву вітку вольт-амперної характеристики діода. Ці прилади, що стабілізують напругу, називають *стабілітронами*.

На рис. 16.13 наведено вольт-амперну характеристику стабілітрона. При значній зворотній напрузі виникає пробій. Великі зміни зворотного струму не змінюють напругу на стабілітроні.

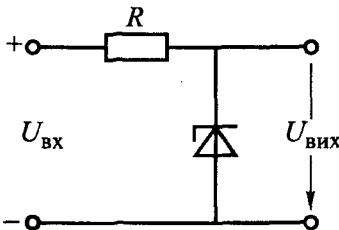


Рис. 16.14

16.7.2. На рис. 16.14 наведено схему стабілізатора напруги на напівпровідниковому стабілітроні. При зміні напруги

$$U_{вх} \geq U_{пр}$$

на навантаженні підтримується напруга

$$U_{вих} = U_{пр}.$$

Сучасні стабілітрони виготовляються на напругу у межах 9...200 В.

16.8. Біполярні транзистори

16.8.1. Транзистори підрозділяються на біполярні та уніполярні.

Біполярні транзистори (або просто транзистори) — це прилади, в яких струм зумовлений рухом носіїв зарядів обох знаків (електронів та дірок).

В **уніполярних** (або польових) транзисторах струм зумовлений рухом носіїв зарядів лише одного знака (електронами чи дірками).

16.8.2. **Транзистор** — це напівпровідниковий прилад, що має два р-п-переходи та три електроди. Середній напівпровідниковий шар називається *базою*, два крайніх — *емітером* (зі стрілкою) та *колектором* (рис. 16.15). Треба пам'ятати, що завжди *стрілка спрямована із р-ділянки у п-ділянку*. Розрізняють два типи транзисторів: р-п-р-типу та п-р-п-типу. Завжди емітерний перехід увімкнений прямо, а колекторний — зворотно.

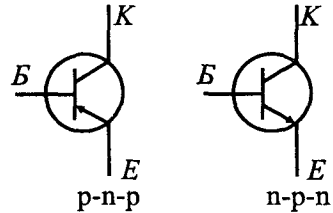


Рис. 16.15

16.8.3. **Транзистор р-п-р-типу підкоряється загальним правилам:**

- емітер має вищий потенціал, ніж потенціал колектора;
- кола база-емітер та база-колектор працюють як діоди (перший — завжди відкритий, другий — закритий);
- кожний транзистор характеризується максимальними значеннями струмів колектора, бази (I_K , I_B) та напругою між колектором та емітером ($U_{кэ}$);
- струм колектора пропорційний струму бази, тобто:

$$I_K = \beta I_B,$$

де β — коефіцієнт підсилення за струмом;

д) щодо транзистора п-р-п-типу, то правила залишаються у силі, але полярність змінюється на протилежну.

16.8.4. Через те, що емітерний перехід умикається прямо, він має малий опір. Колекторний перехід умикається зворотно і має дуже великий опір. До емітера прикладається невелика напруга, а до колектора — дуже велика (десятки вольт). Малою зміною струму емітерного переходу можна керувати великими змінами струму у колі колектора, тобто навантаження. Таким чином, транзистор підсилює потужність.

16.9. Підсилювачі електричних сигналів

16.9.1. Змінна електрична величина подається на вхід підсилювача електричних сигналів. За допомогою енергії джерела живлення підсилювач забезпечує на навантаженні форму вхідного сигналу, величина якого підвищується. Умовно підсилювачі поділяються на:

- підсилювачі напруги;
- підсилювачі струму;
- підсилювачі потужності.

Треба пам'ятати, що підсилювачі напруги та струму також підсилюють потужність.

Для забезпечення потрібного підсилення підсилювачі складаються з кількох каскадів, що мають спільні властивості. Підсилювальний каскад являє собою одну зі *схем вмикання транзистора*.

16.9.2. Розрізняють три схеми вмикання транзисторів:

- зі спільною базою;
- зі спільним емітером;
- зі спільним колектором.

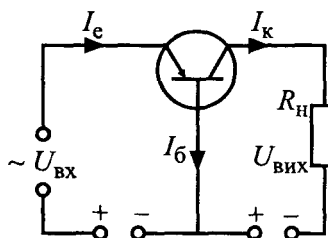


Рис. 16.16

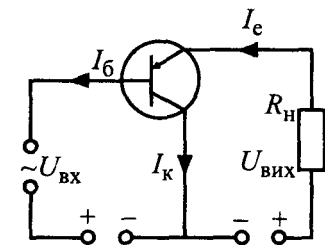


Рис. 16.17

Назва схеми показує, який електрод є спільним для вхідного та вихідного кіл. Схеми відзначаються своїми особливостями, але принцип вмикання підпорядковується загальним правилам транзистора (емітерний перехід відкритий, а колекторний — закритий).

16.9.3. *Схема зі спільною базою* (рис. 16.16) у попередніх підсилювачах використовується дуже рідко. Ця схема має коефіцієнт підсилення струму близький до одиниці.

Схема зі спільним колектором (рис. 16.17) має коефіцієнт підсилення напруги близький до одиниці і дуже великий опір вхідного кола (зворотно увімкнений р-п-перехід). Вихідне коло має малий опір (прямо увімкнений емітерний перехід).

Тому схема зі спільним колектором використовується для узгодження опору багатоомного перетворювача з низькоомним навантаженням. Ця схема має спеціальну назву — *емітерний повторювач*. Вхідний опір емітерного повторювача може сягати 500 кОм, а вихідний — 50...100 Ом.

16.9.4. Найбільшого поширення набула *схема зі спільним емітером* (рис. 16.18). Коефіцієнт підсилення струму цієї схеми сягає 10...200. Невеликий струм бази (вхідного сигналу) керує великим струмом вихідного кола (вихідний сигнал на опорі навантаження). На рис. 16.19 наведено *вхідні статичні характеристики* транзистора р-п-р-типу, увімкненого за схемою зі спільним емітером. Вхідна характеристика (вольтамперна характеристика емітерного переходу) являє собою звичайну праву вітку вольтамперної характеристики діода. Напівпровідниковий транзистор не можна суто механічно уявляти у вигляді двох діодів, тому що процеси в одному переході впливають на процеси в іншому. Вигляд вхідної характеристики залежить від напруги між емітером та колектором.

Вихідна характеристика нагадує вольтамперну характеристику діода, увімкненого зворотно (рис. 16.20). На струм колектора значною мірою впливає струм бази. У робочій ділянці струм колектора незначно залежить від напруги між колектором та емітером.

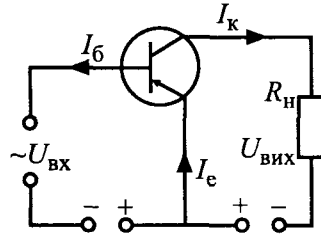


Рис. 16.18

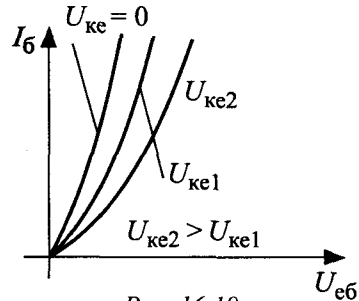


Рис. 16.19

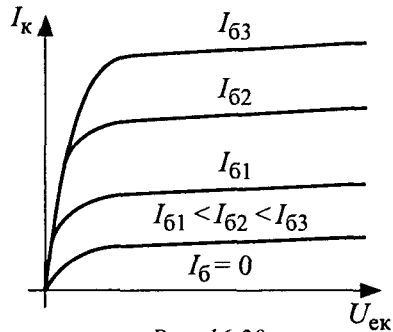


Рис. 16.20

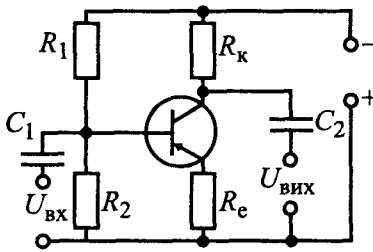


Рис. 16.21

R_e — резистор у колі емітера створює негативний зворотний зв'язок. Змінну напругу краще знімати через конденсатор, що затримує постійну складову вихідного сигналу. З тією ж метою у вхідне коло ставлять конденсатор C_1 . Схема *інвертує*, тобто вихідний сигнал має зворотну полярність.

16.9.6. Зворотні зв'язки забезпечують необхідні характеристики підсилювачів.

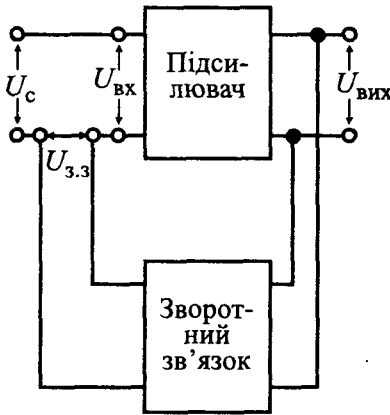


Рис. 16.22

Вводять величини:

$\beta = \frac{U_{3.3}}{U_{ВІХ}}$ — коефіцієнт передачі чотириполюсника зворотного зв'язку (коефіцієнт зворотного зв'язку);

16.9.5. Транзисторну схему можна увімкнути до одного джерела живлення (рис. 16.21). Опори R_1 та R_2 — це розподільвач напруги. Він забезпечує потенціал бази більшим, ніж потенціал колектора, та меншим, ніж потенціал емітера. Тобто при цьому емітерний перехід буде увімкненим прямо, а колекторний — зворотно.

Зворотним зв'язком називають дію вихідного сигналу на вхідний сигнал підсилювача. Зворотні зв'язки створюють спеціально. Самочинні зворотні зв'язки називають *паразитними*. Зворотний зв'язок може бути:

- позитивним;
- негативним.

На рис. 16.22 наведено структурну схему підсилювача зі зворотним зв'язком, де U_c — це напруга джерела сигналу; $U_{ВХ}$ — напруга на вході підсилювача; $U_{3.3}$ — напруга зворотного зв'язку; $U_{ВІХ}$ — напруга на виході підсилювача.

16. Основи напівпровідникової техніки

$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$ — коефіцієнт підсилення підсилювача без ланки зворотного зв'язку;

$K_{3.3} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_c}$ — коефіцієнт підсилення підсилювача зі зворотним зв'язком.

Зворотний зв'язок може підсилювати напругу на вході ($\beta > 0$) та зменшувати її ($\beta < 0$).

У першому випадку ($\beta > 0$) *зворотний зв'язок називається позитивним*. При $\beta < 0$ *зворотний зв'язок називається негативним*.

Позитивний зворотний зв'язок підвищує коефіцієнт підсилення. Одночасно зменшується стабільність підсилювача та підвищується рівень нелінійних спотворень. *Тому позитивний зворотний зв'язок у підсилювачах майже не застосовується.*

Негативний зворотний зв'язок зменшує коефіцієнт підсилення.

При цьому також:

— підвищується стабільність коефіцієнта підсилення;

— знижується рівень нелінійних спотворень;

— зменшується вихідний та підвищується вхідний опір.

Негативний зворотний зв'язок застосовується дуже часто.

У загальному випадку сигнал на вході підсилювача:

$$U_{\text{вх}} = U_c \pm U_{3.3},$$

де верхній знак береться при позитивному, а нижній при негативному зворотному зв'язку. Якщо це рівняння поділити на $U_{\text{вих}}$ та використати введені коефіцієнти, можна отримати:

$$\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} = \frac{U_c}{U_{\text{вих}}} \pm \frac{U_{3.3}}{U_{\text{вих}}},$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{3.3}} \pm \beta$$

або

$$K_{3.3} = \frac{K}{1 \mp \beta K},$$

де коефіцієнт зворотного зв'язку береться за модулем, тому що знак уже врахований у виразі для вхідної напруги підсилювача.

Верхній знак (“-”) відповідає позитивному зворотному зв’язку. При цьому коефіцієнт підсилення збільшується. Знак “+” відповідає негативному зворотному зв’язку, наявність котрого зменшує коефіцієнт підсилення підсилювача.

Позитивний зворотний зв’язок, при якому $\beta K = 1$, називають *критичним*. У цьому разі:

$$K_{3,3} \rightarrow \infty.$$

Це значить, що навіть за відсутності сигналу на вході на виході підсилювача з’являється змінна напруга, тобто підсилювач перетворюється на *генератор гармонійних коливань*.

16.10. Характеристики та параметри транзисторів

16.10.1. *Статичною* називається характеристика транзистора, що описує взаємозв’язок між вхідними та вихідними струмами та напругами, коли у вихідному колі немає навантаження.

Застосовуються такі статичні характеристики біполярних транзисторів:

- а) вхідні;
- б) вихідні;
- в) перехідні.

Вхідна характеристика — це залежність $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$ при сталій напрузі на виході ($U_{\text{вих}} = \text{const}$).

Вихідна характеристика — це залежність $I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вих}})$ при сталому вхідному струмі ($I_{\text{вх}} = \text{const}$).

Перехідна характеристика (характеристика підсилення) — це залежність $I_{\text{вих}} = f(I_{\text{вх}})$ при сталій напрузі на виході ($U_{\text{вих}} = \text{const}$).

Вхідні та вихідні характеристики будують експериментально, а перехідні можна побудувати за допомогою сім’ї вихідних характеристик.

Статичні характеристики біполярних транзисторів різні для кожної зі схем вмикання транзисторів.

16.10.2. На рис. 16.19 наведені *вхідні статичні характеристики* транзистора р-п-р-типу, увімкненого за схемою зі спільним емітером. Вхідна характеристика (вольт-амперна характеристика емітерного переходу) являє собою звичайну праву вітку вольт-амперної характеристики діода. Напівпровідниковий транзистор не можна суто механічно

16. ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ТЕХНІКИ

представляти у вигляді двох діодів, тому що процеси в одному переході впливають на процеси в іншому. Вигляд вхідної характеристики залежить від напруги між емітером та колектором.

Вихідна характеристика нагадує вольт-амперну характеристику діода, увімкненого зворотно (рис. 16.20). На струм колектора значною мірою впливає струм бази.

На рис. 16.23 наведено статичні перехідні характеристики транзисторів, увімкнені за схемою зі спільним емітером.

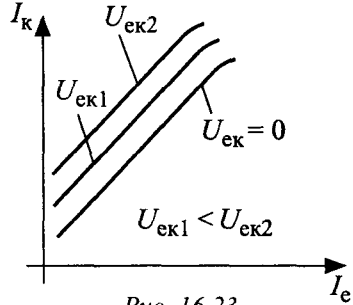


Рис. 16.23

16.10.3. При розрахунках схем із біполярними транзисторами застосовують h -параметри транзистора. Ці параметри характеризують властивості транзистора при малих змінах струмів і напруг. h -параметри транзистора різні для кожної схеми вмикання транзистора, але у довідках є формули перерахунку параметрів однієї схеми в інші.

Для схеми зі спільним емітером h -параметри за допомогою вхідних і вихідних струмів і напруг мають такий вигляд:

Параметр h_{11} являє собою вхідний опір транзистора:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{6e}}{\Delta I_6} \quad \text{при } U_{ке} = \text{const.}$$

Параметр h_{12} — це коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою:

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{6e}}{\Delta U_{ке}} \quad \text{при } I_6 = \text{const.}$$

Параметр h_{21} — коефіцієнт підсилення за струмом:

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \quad \text{при } U_{ке} = \text{const.}$$

Параметр h_{22} характеризує вихідну провідність транзистора:

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{ке}} \quad \text{при } I_6 = \text{const.}$$

16.10.4. Суттєвими є три обмеження використання транзистора.

Обмеження за потужністю, що виділяється на колекторному переході ($P_{км}$), не дає змоги переходу перегріватися.

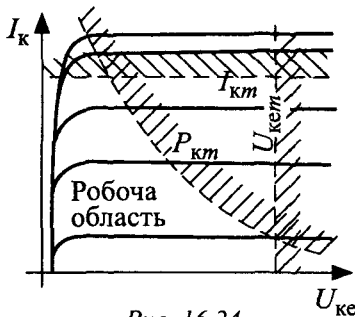


Рис. 16.24

Обмеження за напругою між колектором і емітером ($U_{кем}$) забезпечує відсутність пробоя колекторного переходу.

Обмеженість за колекторним струмом ($I_{км}$) також зберігає роботоспроможність переходу.

На рис. 16.24 наведена робоча ділянка вихідних характеристик біполярних транзисторів, що створюється обмежувальними кривими.

16.11. Польові транзистори

16.11.1. У польових (уніполярних) транзисторах електричний струм створюється *рухом носіїв заряду тільки одного знака*. Керування струмом здійснюється електричним полем, що створюється вхідним сигналом, а не струмом бази. Тому у керуючому електроді (затворі) струм майже не протікає. Отже, польовий транзистор має дуже великий вхідний опір.

Польові транзистори використовують у підсилювачах потужності та перетворювачах електричних коливань.

Є два типи польових транзисторів:

- із керуючим р-п-переходом;
- із ізолюваним затвором.

16.11.2. Транзистор із керуючим р-п-переходом являє собою напівпровідникову пластину. На грані цієї пластини нанесено напівпровідник іншого типу. Транзистор має три електроди: стік *с*, витік *в* та затвор *з*. Електрод, від якого рухаються основні заряди, називається *витоком*. Електрод, до якого рухаються заряди, називається *стоком*.

Із рис. 16.25 видно, що при зниженні потенціалу на *затворі* зменшується переріз n-каналу, тобто збільшується його опір (зменшується струм стоку). Затвор завжди вмикається зворотно до витоку.

16. Основи напівпровідникової техніки

На рис. 16.26 наведені умовні позначення транзистора з керуючим р-п-переходом (*а* — з п-каналом, *б* — з р-каналом).

Польові транзистори, як і біполярні, мають три схеми вмикання:

- зі спільним витоком;
- зі спільним стоком;
- зі спільним затвором.

Основною підсилювальною схемою є **схема зі спільним витоком** (рис. 16.27).

16.11.3. **Вихідні характеристики** схеми зі спільним витоком називаються **стокowymi** характеристиками (рис. 16.28). Вони нагадують вихідні характеристики біполярного транзистора.

16.11.4. У транзисторі з керуючим р-п-переходом є діодне з'єднання, тому існує струм витоку. При позитивному заряді на затворі спостерігається звичайна діодна провідність. У транзисторах з **ізолюваним затвором** між матеріалами з різними провідностями знаходиться плівка оксиду SiO. Затвор дійсно ізолюваний від витоку та стоку й діє на струм тільки своїм електричним полем. Конструктивно транзистор виконується на напівпровідниковій підкладці, що має провідність, протилежну провідності каналу. Підкладка позначається на схемах стрілкою. Основною є схема вмикання зі спільним витоком (рис. 16.29).

Стоківі характеристики польового транзистора з ізолюваним затвором,

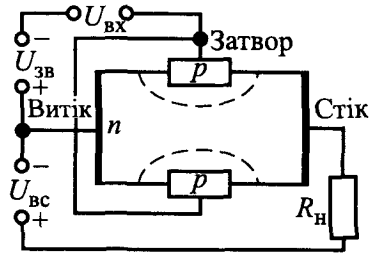


Рис. 16.25

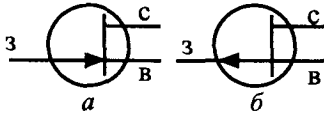


Рис. 16.26

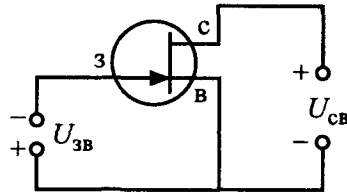


Рис. 16.27

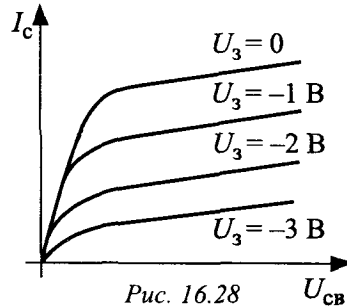


Рис. 16.28

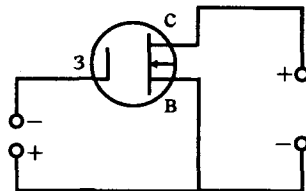


Рис. 16.29

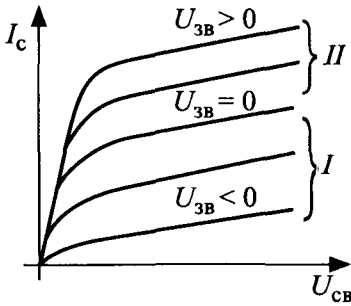


Рис. 16.30

увімкненого за схемою зі спільним витоком, нагадують вихідні характеристики біполярного транзистора (рис. 16.30). *Режим збіднювання I* характеризується негативним потенціалом на затворі, *режим збагачення II* — позитивним. Позитивний потенціал на затворі сприяє розширенню каналу, зменшує його опір та підвищує стоковий струм.

16.12. Підсилювачі постійного струму

16.12.1. Підсилювачі постійного струму (ППС) підсилюють сигнал дуже низької частоти (менше за герц). За таких низьких частот не можна застосовувати конденсатори та трансформатори для зв'язку між каскадами підсилювача. Тому у ППС елементами зв'язку є резистори.

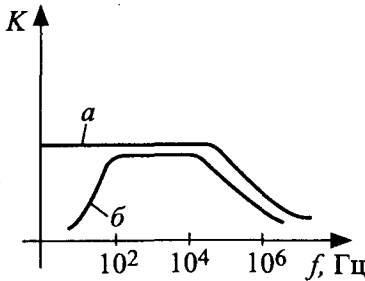


Рис. 16.31

Для прикладу, на рис. 16.31 наведено частотну характеристику підсилювача з резисторно-ємнісним зв'язком (крива *a*) та тільки з ємнісним зв'язком (крива *б*).

Потребує розв'язання проблема відділення корисного сигналу від сталих складових струму та напруги, що подається на транзистори.

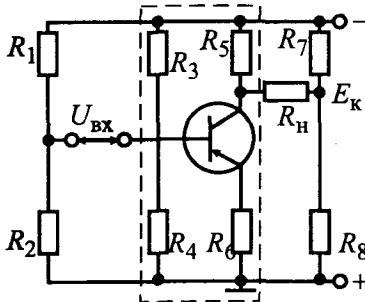


Рис. 16.32

16.12.2. Схему підсилювача постійного струму наведено на рис. 16.32. Звичайний підсилювальний каскад, що набирається на транзисторі за схемою зі спільним емітером, виділено штриховою лінією. Конденсатор у колі емітера відсутній, що забезпечує більшу смугу пропускання. Навантаження вмикається між колектором та середньою точкою подільника напруги $R_7 - R_8$.

16. ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ТЕХНІКИ

Вхідна напруга прикладена між базою та середньою точкою подільника $R_1 — R_2$.

Подільники напруги $R_1 — R_2$ та $R_7 — R_8$ добирають у такий спосіб, щоб за відсутності вхідного сигналу струм у навантаженні не протікав. Струм у резисторі R_{11} з'являється тільки за наявності вхідного сигналу.

16.13. Генератори гармонійних сигналів

16.13.1. Генератором гармонійних сигналів називається пристрій, що перетворює енергію джерела постійного струму на енергію електромагнітних коливань.

Генератори сигналів можуть класифікуватися:

- а) за формою генерованих сигналів:
 - генератори гармонійних коливань;
 - генератори негармонійних коливань (пилоподібних, прямокутних);
- б) за способом збудження:
 - генератори з незалежним або зовнішнім збудженням;
 - генератори із самозбудженням (автогенератори);
- в) за видом зворотного зв'язку:
 - RC-генератори;
 - LC-генератори;
 - RL-генератори;
 - RLM-генератори;
- г) за генерованою частотою:
 - низькочастотні (до 100 кГц);
 - високочастотні (0,1...100 МГц);
 - надвисокочастотні (більше за 100 МГц).

Генератор із незалежним збудженням являє собою підсилювач, на вхід якого подається сигнал від автогенератора.

16.13.2. При критичному позитивному зворотному зв'язку підсилювач гармонійних коливань перетворюється на генератор гармонійних сигналів. Структурну схему цього генератора наведено на рис. 16.33.

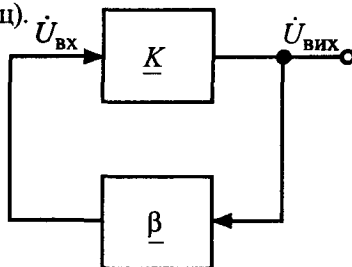


Рис. 16.33

Якщо вхідні та вихідні напруги, коефіцієнти підсилення та зворотного зв'язку уявити як величини комплексні, то умова самозбудження має вигляд:

$$\underline{K}\underline{\beta} = 1.$$

У комплексних коефіцієнтах:

$$\underline{K} = Ke^{j\varphi},$$

$$\underline{\beta} = \beta e^{j\psi},$$

φ і ψ — зсуви фаз напруги підсилювачем та зворотним зв'язком.

Комплексні вирази умови самозбудження матимуть такий вигляд:

– умова балансу амплітуди:

$$K\beta = 1;$$

– умова балансу фаз:

$$\psi + \varphi = 2\pi n.$$

При виконанні цих умов схема повинна працювати як автогенератор. Але для компенсації втрат у пристрої треба виконання співвідношення:

$$K\beta \geq 1.$$

16.13.3. Виникнення автогенерації можна розглянути на прикладі підсилювальної схеми р-п-р транзистора. Підвищення потенціалу бази зменшує колекторний струм та потенціал колектора, якщо:

а) у будь-який спосіб підвищився потенціал колектора (зріс струм при вмиканні джерела живлення);

б) ланцюжок зворотного зв'язку з запізненням цей потенціал подав на базу, і потенціал бази підвищився, що спричинило зменшення струму колектора та його потенціалу;

в) ланцюжок зворотного зв'язку через деякий час подав зменшення потенціалу колектора на базу. Внаслідок цього збільшився струм колектора та його потенціал;

г) без зовнішніх сигналів пристрій видає на виході електромагнітні коливання. При виконанні умов балансу амплітуд і фаз підсилювач перетвориться на автогенератор синусоїдних коливань.

16.13.4. Для прикладу можна розглянути RC-автогенератор, складений за схемою зі спільним емітером (рис. 16.34).

Підсилювач відтворює поворот фази на 180° . Для забезпечення умов балансу фаз коло зворотного зв'язку також обертає фазу на 180° за допомогою триланкового Г-подібного RC-ланцюжка (на схемі пунктир).

Частота коливань регулюється підбором резисторів R та ємностей C . Регулювати коефіцієнт підсилення K можна зміною опору навантаження R_H .

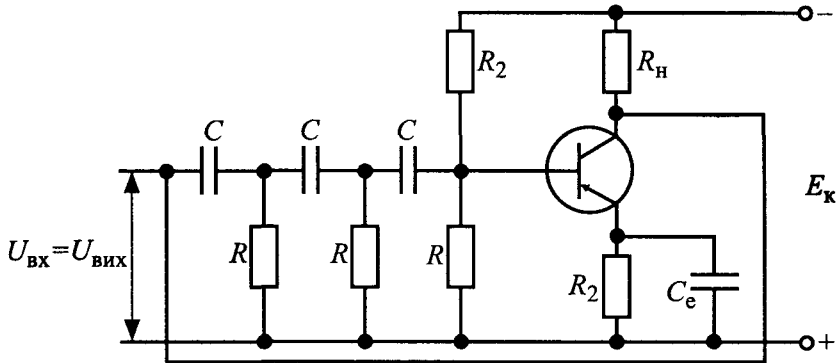


Рис. 16.34

16.14. Імпульсні пристрої (основні поняття)

16.14.1. *Імпульсний режим* роботи радіопристроїв передбачає чергування короткочасного сигналу з паузами. Імпульсний режим має декотрі переваги над безперервним режимом роботи апаратури:

а) дозволяє досягати більшої потужності в імпульсі при незначній середній потужності пристрою, у зв'язку з чим імпульсні пристрої мають менші габарити та масу порівняно з пристроями безперервного режиму роботи рівної середньої потужності;

б) забезпечує підвищення пропускної спроможності та завадостійкості апаратури;

в) конструкція імпульсних пристроїв складається з великої кількості однакових, порівняно простих елементів, котрі виробляються інтегральними методами, що, у свою чергу, підвищує надійність апаратури, зменшує її масу та габарити.

Імпульсні пристрої широко застосовуються у різних галузях електроніки:

- в електронно-обчислювальній техніці;
- в радіолокації та телебаченні;
- в системах автоматики та промислової електроніки тощо.

16.14.2. **Імпульс** — це електрична величина (струм, напруга), яка протягом короткого проміжку часу змінюється від одного сталого значення до другого.

Імпульси бувають двох типів:

- відеоімпульси;
- радіоімпульси.

Відеоімпульс — це короткочасна зміна електричної величини.

Радіоімпульс — це серія безперервних високочастотних коливань електричної величини, огинаюча котрих — відеоімпульс.

На рис. 16.35 наведені відеоімпульси *a* та радіоімпульси *b* різної форми.

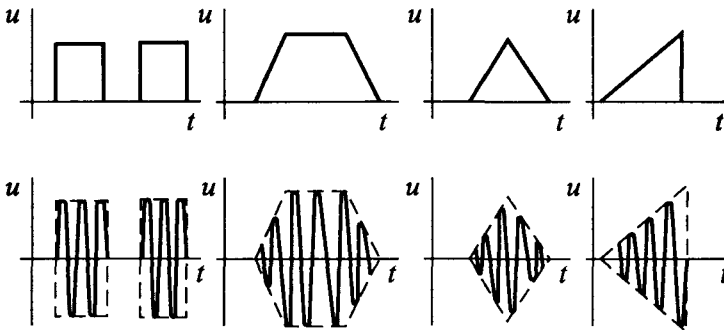


Рис. 16.35

16.15. Імпульсні підсилювачі

16.15.1. Звичайні підсилювачі гармонійних коливань мають обмежену смугу пропускання.

У зв'язку з цим при підсиленні імпульсу виникають спотворення (рис. 16.36). Внаслідок підсилення подовжується фронт імпульсу, з'являється викид електричної величини.

Крім того, спостерігається укіс вершини імпульсу та подовження зрізу. Тому основними вимогами щодо імпульсних підсилювачів є:

- низькочастотна корекція;
- високочастотна корекція.



Рис. 16.36

16.15.2. **Низькочастотна корекція** (зменшення укосу вершини імпульсу) полягає у збільшенні коефіцієнта підсилення зі зменшенням частоти сигналу. Цього досягають увімкненням у коло колектора R_5 та C_4 (рис. 16.37). На високих частотах ємнісний опір незначний і **коректуюче** коло практично не впливає на коефіцієнт підсилення. В зоні низьких частот ємнісний опір конденсатора C_4 великий і колекторний струм визначається резистором R_5 . У такий спосіб коефіцієнт підсилення підвищується в зоні низьких частот, і зменшується укіс вершини імпульсу.

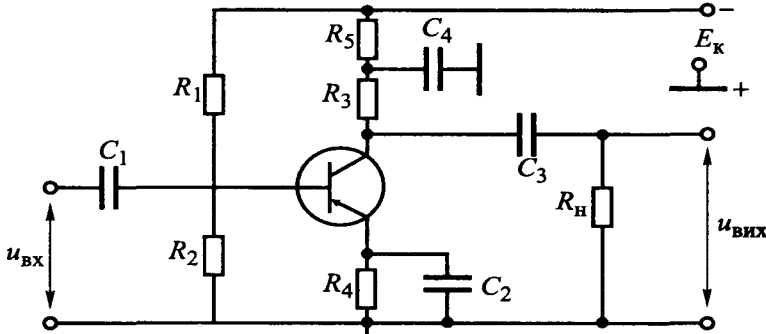


Рис. 16.37

16.15.3. **Високочастотна корекція** (зменшення фронту і викиду імпульсу) полягає у підвищенні коефіцієнта підсилення на високих частотах. Індуктивність L і ємність C_4 створюють резонансний контур, що навантажує каскад (рис. 16.38). На високих частотах контур знаходиться поблизу резонансу, тобто має дуже великий опір. Якщо ж зростає опір навантаження, то зростає і коефіцієнт підсилення з підвищенням частоти сигналу.

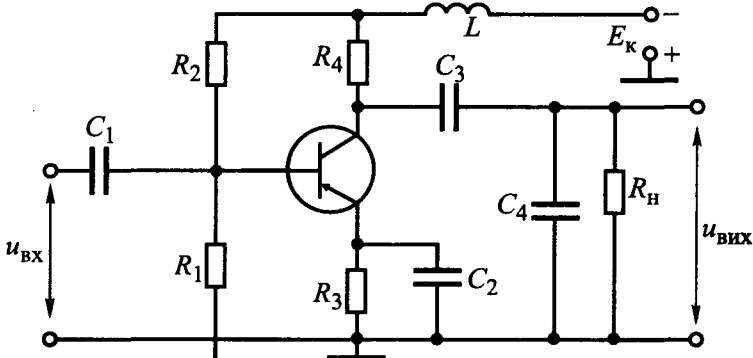


Рис. 16.38

16.16. Диференціюючі та інтегруючі ланцюги, лінії затримки

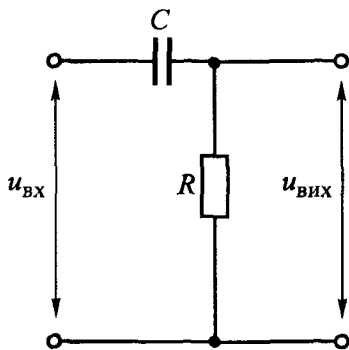


Рис. 16.39

16.16.1. Для кола, наведеного на рис. 16.39, можна записати рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$u_{\text{ВХ}} = iR + u_C.$$

Струм, що протікає через конденсатор:

$$i = C \frac{du_C}{dt}.$$

Якщо опір R невеликий, то можна вважати:

$$i = C \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Тобто вихідний сигнал пропорційний диференціалу вхідного:

$$u_{\text{ВИХ}} = RC \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Таке електричне коло називається *диференціюючим ланцюгом*. На рис. 16.40 наведено імпульси на вході *а* та на виході диференціюючого ланцюга *б*.

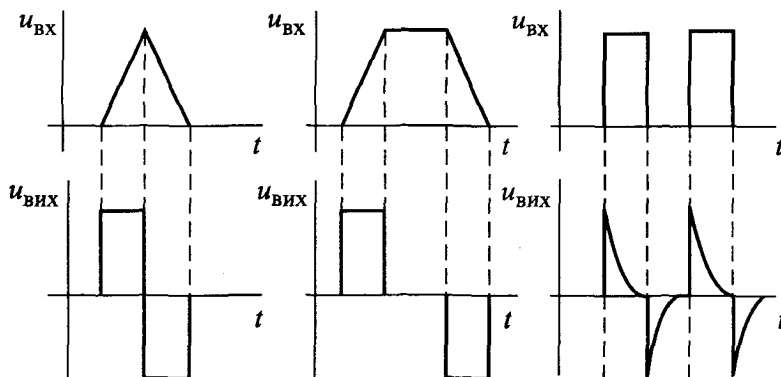


Рис. 16.40

16.16.2. Якщо подати сигнал на вхід схеми, наведеної на рис. 16.41, то:

$$u_{\text{вих}} = u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

Якщо стала часу кола досить велика, то можна вважати:

$$i = \frac{u_{\text{вх}}}{R}.$$

Отже,

$$u_{\text{вих}} = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}} dt.$$

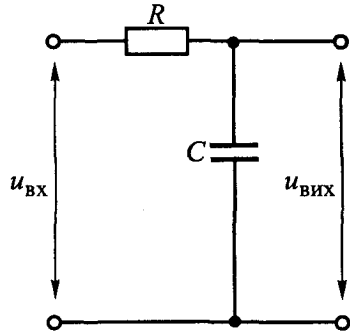


Рис. 16.41

Таке коло називається *інтегруючим ланцюгом*.

16.16.3. Лінії затримки затримують вихідний сигнал відносно вхідного. Найпростіші лінії затримки складаються з RC (а) або LR (б) елементів (рис. 16.42). За допомогою таких пристроїв можна затримати вхідний імпульс на час $T_3 = (2...3)\tau$.

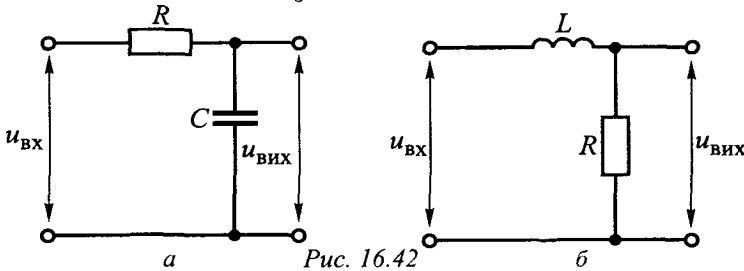


Рис. 16.42

Недоліками таких ліній затримки є сильне спотворення форми імпульсу та невеликий час затримки.

Застосовуються багатоланкові лінії затримки, що дають змогу зменшити спотворення імпульсу та збільшити час затримки (рис. 16.43).

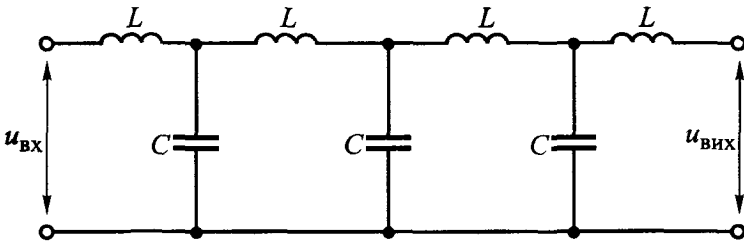


Рис. 16.43

16.17. Тригери

16.17.1. *Тригером називається пристрій, що має два стійких ста-ни та спроможний стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу.*

За відсутності керуючої дії тригер нескінченно довго залишається у стані стійкої рівноваги, тобто на вихідні напруги не впливають дестабілізуючі чинники (зміна напруги живлення, завади коливання температури).

Тригери призначені для формування прямокутних імпульсів, поділу частоти, рахування імпульсів, запам'ятовування інформації. Сучасні ЕОМ на 20...30% складаються з тригерів.

16.17.2. Схему симетричного тригера на біполярних транзисторах наведено на рис. 16.44. Особливостями схеми є:

- повна симетрія схеми;
- резисторний зв'язок між каскадами (колектор кожного транзистора через резистор зв'язаний з базою другого);
- позитивний потенціал, поданий на бази транзисторів для надійного запирання.

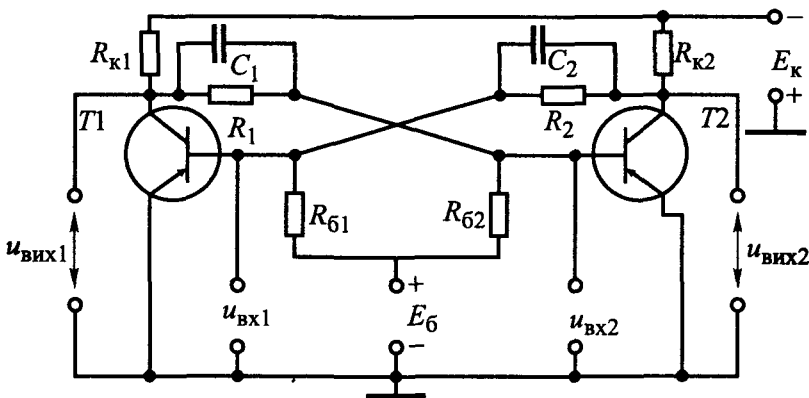


Рис. 16.44

При ідеальній симетрії обидва транзистори зачинені через позитивний потенціал на базах. У реальних схемах не буває ідеальної симетрії через розкид параметрів емітерів. Тому через один транзистор (наприклад $T1$) протікає більший струм. Таким чином на колекторі

16. Основи напівпровідникової техніки

транзистора $T1$ підвищується потенціал. Цей підвищений потенціал подається на базу транзистора $T2$, що спричиняє зміну струму через цей транзистор і зменшення падіння напруги на опорі R_{k2} . Внаслідок цього знижений потенціал подається на базу транзистора $T1$, викликає зміну струму через нього і т. д. Процес проходить лавиноподібно, тобто один транзистор $T1$ відчинено (працює у режимі насичення), а другий $T2$ зачинено. У тригерах завжди один із транзисторів працює в режимі насичення, а другий — зачинено.

16.17.3. Схеми запуску тригера можуть бути різними. На обидві бази можна подавати імпульси однієї полярності (схема роздільного запуску). Того ж результату можна досягти, якщо подавати на одну з баз імпульси чергуючої полярності. Хай, наприклад, транзистор $T1$ відчинено, а транзистор $T2$ зачинено. Якщо на базу $T1$ подати позитивний імпульс, то транзистор зачиниться. Потенціал на колекторі зменшиться до $-E_k$, тобто негативний потенціал буде подаватися на базу транзистора $T2$. Цей транзистор відчиняється і працюватиме в режимі насичення. Повернути тригер у вихідний стан можна поданням позитивного імпульсу на базу транзистора $T2$ або негативного — на базу транзистора $T1$.

II. ПРАКТИКУМ

1. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Кожна лабораторна робота виконується на окремому робочому місці. Виконання роботи передбачає складання схем, вимірювання, обробку отриманого дослідного матеріалу та складання звіту спостережень.

Перед складанням схеми необхідно ознайомитися з матеріальною частиною: приладами, автотрансформаторами, джерелами живлення, осцилографами та ін., записати їх паспортні дані.

Дуже важливо з'ясувати, які затискачі приладів відповідають тим чи іншим джерелам схеми. На першому занятті студенти ознайомлюються з основними правилами техніки безпеки. Про знання цих правил та про відповідальність за їх виконання кожен студент розписується в журналі реєстрації інструктажу з техніки безпеки.

Перед початком складання кола необхідно переконатись у тому, що напруга на затискачах джерела живлення відсутня.

Складаючи схему досліджень, основну увагу треба звернути на надійність контактів.

При складанні кола завжди слід збирати спочатку головне послідовне коло з амперметром і струмовими колами ватметрів, потім допоміжні та паралельні кола, підключаючи вольтметри та обмотки напруги ватметрів. При такій послідовності складання схеми кола зменшується можливість неправильних з'єднань, а також значно скорочується час збирання кола.

Перед вмиканням електричного кола всі апарати, що регулюють струм і напругу (реостати, автотрансформатори), повинні бути встановлені в положення, яке відповідає мінімуму величини, що регулюється. Усі багатомежеві прилади повинні бути увімкнені на максимальні межі вимірів. Перехід на менші межі вимірів допускається тільки після докладної перевірки роботи кола.

Складена схема обов'язково перевіряється усіма членами бригади, які виконують дану роботу, а потім вже викладачем або лаборантом. Без дозволу викладача підключати коло до мережі

ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ!

На увімкненому під напругу колі слід зробити всі регулювання та перевірити почергово всі потрібні режими роботи. Необхідно постійно стежити за показами вимірювальних приладів. Якщо стрілки приладів виходять за межі шкали, необхідно негайно вимкнути вимикач.

Під час роботи забороняється відходити від обладнання, що знаходиться під напругою.

Під час проведення досліду покази приладів записують у заздалегідь складені таблиці із зазначенням постійної ціни поділки приладу.

Після закінчення всіх спостережень і вимірювань коло вимикається з мережі, але не розбирається до затвердження викладачем попередніх результатів роботи. Експеримент із помилковими даними слід повторити.

Про виконану лабораторну роботу складається звіт. Бригада, яка не подала звіт про попередню роботу, до лабораторних робіт не допускається.

Під час роботи в лабораторії студенти повинні дотримуватись правил техніки безпеки й правил внутрішнього розпорядку вищого навчального закладу.

Студенти, які порушують ці правила, від роботи в лабораторії відстороняються.

У випадках, коли порушення правил тягне за собою зруйнування обладнання, ремонт та відновлення останнього проводиться за кошти порушника.

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Перед початком лабораторних занять студенти повинні ознайомитися з правилами техніки безпеки і суворо дотримуватися їх при виконанні лабораторних завдань. Необхідно дотримуватись наступних правил безпеки:

1. Перед початком роботи слід перевірити відсутність напруги на затискачах джерела.
2. Увімкнути схему під напругу, переконавшись, що ніхто не торкається до струмопровідних частин схеми.
3. Перед вмиканням кола під напругу попередити про це всіх членів бригади.
4. Вмикати схему в мережу без попередньої перевірки її викладачем або лаборантом категорично забороняється.
5. Після вмикання схеми забороняється торкатися руками проводів і частин приладів, що знаходяться під напругою.
6. Будь-які зміни в схемі кола виконувати тільки після вимкнення її з мережі. Вмикання в мережу після внесених змін проводити з дозволу викладача.
7. При виявленні відхилень у роботі елементів кола негайно відключити його від мережі і повідомити про це викладача або лаборанта.
8. Категорично забороняється залишати без нагляду електроустановку, що знаходиться під напругою.
9. Розбирати коло тільки після відключення його від джерел напруги на робочому місці.
10. Головні вимикачі вмикаються й вимикаються тільки викладачем або лаборантом.
11. При нещасному випадку негайно вимкнути напругу і надати першу допомогу тому, хто постраждав від електричного струму.

ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ ПО ЛАБОРАТОРНИМ РОБОТАМ

По кожній виконаній роботі студенти складають звіт. Заголовний лист звіту слід виконати за встановленою формою.

У звіті наводяться такі відомості:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета роботи.
3. Необхідне обладнання: перелік апаратури та приладів, що використовуються в роботі, з їх технічними характеристиками (найменування, тип, система, номінальне значення напруги і струму, клас точності та ін.).

Лабораторні роботи

4. Принципова електрична схема досліджуваного кола. Усі схеми кресляться з дотриманням умовних графічних позначень, встановлених стандартами.

5. Порядок виконання роботи з таблицями результатів вимірювань та обчислень.

6. Графічні побудови. Графіки та векторні діаграми будуються за даними вимірювань і обчислень у масштабі в прямокутній системі координат. На вісях координат повинні бути вказані позначки, розмірність та числові значення величини.

Якщо декілька змінних є функцією будь-якої однієї змінної і ці змінні необхідно зобразити графічно, то усі криві слід креслити на одній діаграмі.

При побудові кривої за дослідними даними спочатку наносять точки, а потім проводять пряму або плавну криву, яка характеризує загальну закономірність зміни досліджуваної величини.

7. У звіті необхідно навести основні розрахункові формули, підставити в них експериментальні дані і дати кінцевий результат обчислень.

8. У кінці звіту необхідно навести основні висновки, що впливають із виконаної роботи, які повинні представляти собою самостійний аналіз проведеного експерименту.

ФОРМА ЗВІТУ ПО ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ

Назва навчального закладу

Назва кафедри

Назва лабораторії

З В І Т

по лабораторній роботі № _____

(повне найменування роботи)

Робота виконана:

Студент _____ Група _____
(прізвище, ім'я по батькові)

Сукупно зі студентами _____
(група, прізвище, ініціали)

(Дата оформлення звіту)

(підпис студента, який виконав роботу)

Звіт прийнято _____ Керівник _____

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРАХУНКУ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ МЕТОДОМ СУПЕРПОЗИЦІЇ

1.1. Мета роботи

Дослідна перевірка розрахунку розгалуженого електричного кола з декількома джерелами і приймачами електричної енергії методом суперпозиції та встановлення основних закономірностей розповсюдження струмів і напруг у цьому колі.

1.2. Основні теоретичні положення

Основою для розрахунків складного розгалуженого кола є закон Ома та два закони Кірхгофа.

Відповідно до закону Ома, електричний струм на визначеній нерозгалуженій ділянці кола дорівнює алгебраїчній сумі – напруги, прикладеної до цієї ділянки, і діючих ЕРС на цій ділянці, що поділена на суму опорів ділянки:

$$I = \frac{U \pm \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (1.1)$$

За першим законом Кірхгофа, для будь-якого вузла розгалуженого кола алгебраїчна сума струмів, що сходяться у цьому вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (1.2)$$

Другий закон Кірхгофа визначає зв'язок між ЕРС і напругами контури розгалуженого кола. За цим законом, алгебраїчна сума ЕРС, діючих у контурі, дорівнює сумі падінь напруг на окремих його ділянках:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i, \quad (1.3)$$

Користуючись цими законами, можна провести розрахунок будь-якого лінійного розгалуженого кола постійного струму.

Проте, розрахунок складних електричних кіл за допомогою рівнянь, складених за законами Кірхгофа, вимагає великого об'єму розрахункових робіт, пов'язаних із розв'язанням складної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Є декілька методів розрахунку складних електричних кіл, які базуються на законах Кірхгофа, але з меншим об'ємом розрахунків.

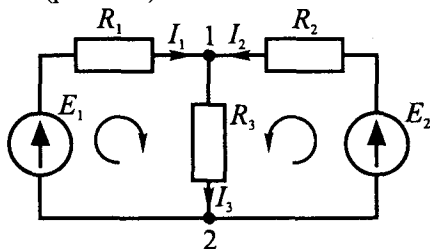
Найбільш розповсюдженими методами розрахунку розгалужених кіл є:

- метод накладання (суперпозиції);
- метод контурних струмів;
- метод вузлової напруги.

Розглянемо метод накладання, що базується на принципі суперпозиції, який формулюється таким чином: струм будь-якої вітки електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів, викликаних дією кожного окремого джерела, що міститься у цьому колі.

Приклад:

Для схеми кола (рис. 1.1)



- $E_1 = 10 \text{ В};$
- $E_2 = 7 \text{ В};$
- $R_1 = 50 \text{ Ом};$
- $R_2 = 100 \text{ Ом};$
- $R_3 = 100 \text{ Ом}.$

Рис. 1.1

струм методом накладання визначається у наступній послідовності.

Визначаємо струми, які виникають у колі від дії ЕРС E_1 (рис. 1.2):

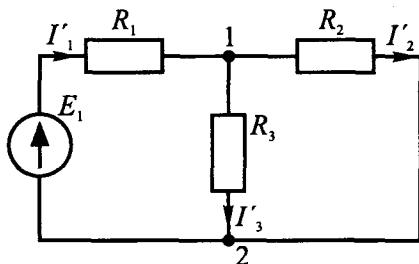


Рис. 1.2

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)} = \frac{10}{50 + 100 \cdot 100 / (100 + 100)} = 0,1 \text{ A};$$

$$I'_2 = I'_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0,1 \cdot \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A};$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 0,1 \cdot \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A}.$$

Визначаємо струми, що течуть у колі від дії ЕРС E_2 (рис. 1.3)

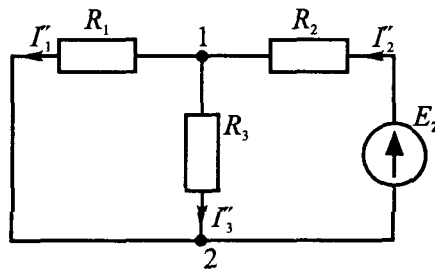


Рис. 1.3

$$I''_2 = \frac{E_1}{R_2 + R_1 R_3 / (R_1 + R_3)} = \frac{7}{100 + 50 \cdot 100 / (50 + 100)} = 0,0525 \text{ A};$$

$$I''_1 = I''_2 \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 100 / (50 + 100) = 0,035 \text{ A};$$

$$I''_3 = I''_2 \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 50 / (50 + 100) = 0,0175 \text{ A}.$$

Дійсні струми у вітках дорівнюють:

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 0,05 + 0,0175 = 0,0675 \text{ A};$$

$$I_2 = I''_2 - I'_2 = 0,0525 - 0,05 = 0,0025 \text{ A};$$

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 0,1 + 0,035 = 0,065 \text{ A}.$$

1.3. Програма роботи

- 1.3.1. Виміряти ЕРС джерел електричної енергії.
 1.3.2. Окремо виміряти струм у вітках кола при дії кожного джерела окремо.
 1.3.3. Виміряти струм у вітках розгалуженого кола при двох увімкнених у коло джерелах енергії.

1.4. Необхідне обладнання:

- | | |
|--------------------------------------|------------|
| 1.4.1. Стенд з опорами | – 1 шт. |
| 1.4.2. Амперметр | – 3 шт. |
| 1.4.3. Універсальне джерело живлення | – 1 шт. |
| 1.4.4. З'єднуючі проводи | – 1 компл. |

1.5. Порядок виконання роботи

- 1.5.1. Ознайомитися з робочою схемою і зібрати коло (рис. 1.4).

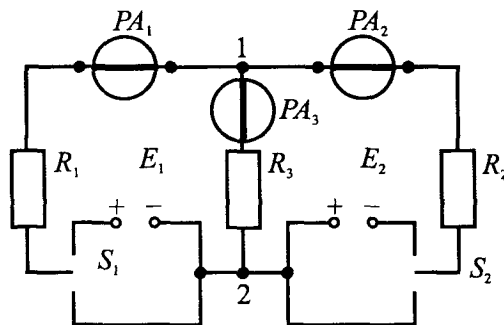


Рис. 1.4

1.5.2. Після перевірки схеми подати напругу на блок живлення і встановити за допомогою вольтметра задані значення джерел ЕРС E_1 і E_2 при розімкнених вимикачах S_1 і S_2 .

1.5.3. Визначити струми у вітках схеми методом накладання, для чого:
 а) встановити перемикач S_1 у верхнє положення, а перемикач S_2 у нижнє. При цьому живлення кола здійснюється від джерела E_1 . Записати покази амперметрів PA_1 , PA_2 , PA_3 у таблицю 1.1;

б) встановити перемикач S_1 у нижнє положення, а перемикач S_2 у верхнє. При цьому живлення кола здійснюється від джерела E_2 . Записати покази амперметрів PA_1 , PA_2 , PA_3 . Результати вимірювань записати в таблицю 1.1;

в) встановити перемикачі S_1 і S_2 у верхнє положення і при живленні кола від джерел E_1 і E_2 зробити вимірювання струмів у вітках амперметрами PA_1 , PA_2 , PA_3 , а результати вимірювань занести у таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

ЕРС		Струми		
		Виміри		
$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$
	х			
х				

1.5.4. Розрахувати значення струмів у колі методом накладання і порівняти з дослідними даними. Величини опорів R_1 , R_2 , R_3 задаються викладачем.

1.6. Зміст звіту

1.6.1. Мета роботи.

1.6.2. Необхідне обладнання.

1.6.3. Електрична схема досліджуваного кола.

1.6.4. Таблиці з дослідними і розрахунковими даними.

1.6.5. Висновки.

1.7. Контрольні запитання

1.7.1. Сформулюйте закони Кірхгофа.

1.7.2. Назвіть основні етапи метода розрахунку за рівняннями Кірхгофа.

1.7.3. Охарактеризуйте основні етапи метода контурних струмів.

1.7.4. Сформулюйте принцип і метод накладання.

1.7.5. У чому полягає метод вузлових напруг?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Мета роботи

Вивчення основних характеристик лінії електропередачі постійного струму за допомогою фізичної моделі.

2.2. Основні теоретичні положення

Нерозгалужена лінія електропередачі постійного струму являє собою двопровідну лінію, до початку якої підімкнене джерело, а до кінця – приймач електричної енергії; за допомогою цієї лінії енергія передається від джерела до приймача.

В умовах лабораторії дослідження лінії ведеться на фізичній моделі, електрична схема якої зображена на рис. 2.1.

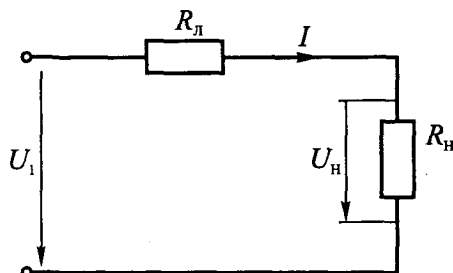


Рис. 2.1

Тут U_1 – напруга джерела;

R_L – опір лінії;

U_H – напруга на навантаженні;

R_H – опір навантаження.

Розглянемо режим роботи лінії передачі при незмінній напрузі на початку лінії. Струм лінії визначається за законом Ома:

$$I = \frac{U_1}{R_L + R_H}. \quad (2.1)$$

Опір R_H може змінюватися від нуля до нескінченності. При $R_H=0$

струм у лінії $I = \frac{U_1}{R_L}$ зветься струмом короткого замикання, а режим

Лабораторні роботи

роботи лінії – режимом короткого замикання. При $R_H = \infty$ струм у лінії дорівнює нулю, лінія при цьому розімкнена, і такий режим зветься режимом холостого ходу. При зміні R_H від 0 до ∞ струм змінюється за законом гіперболи. Напруга на затискачах приймача нижча за напругу на початку лінії і відрізняється на величину падіння напруги ΔU у лінії:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - IR_L. \quad (2.2)$$

При сталих U_1 і R_L напруга U_2 залежить від струму I . Закон зміни $U_2 = f(I_2)$ відповідає прямій лінії (рис.2.2).

При $R_H = \infty$ струм $I=0$, U_2 має найбільше значення $U_2 = U_1$.

При $R_H = 0$ струм I дорівнює струмові короткого замикання. $I = I_K$ і $U_2 = 0$:

$$U_2 = U_1 - I_K R_L = U_1 - \frac{U_1}{R_L} R_L = 0. \quad (2.3)$$

Потужність джерела електричної енергії P_1 залежить від напруги джерела U_1 і струму I , що тече крізь нього:

$$P_1 = U_1 I. \quad (2.4)$$

Закон зміни $P_1 = f(I)$ представляє собою пряму лінію. Найменше

значення $P=0$ при холостому ході лінії, а найбільше $P_1 = U_1 I_K = \frac{U_1^2}{R_L} -$ при короткому замиканні. Втрати потужності пропорційні квадрату струму і опору лінії:

$$\Delta P = I^2 R_L. \quad (2.5)$$

Залежність $\Delta P = f(I)$ являє собою вітку параболи. Для її побудови необхідно мати три значення. Наприклад:

$$I = 0, \Delta P = 0; I = I_K, \Delta P = I^2 R_L = \frac{U_1^2}{R_L}; I = \frac{I_K}{2}, \Delta P = \frac{I_K^2 R_L}{4} = \frac{U_1^2}{4R_L}. \quad (2.6)$$

Потужність, що споживається приймачем електричної енергії P_2 , визначається згідно з рівнянням:

$$P_2 = P_1 - \Delta P = U_1 I - I^2 R_L. \quad (2.7)$$

Закон зміни потужності P_2 у функції від струму I , тобто $P_2 = f(I)$ має вигляд параболи (рис. 2.2.). Найменших значень $P_2 = 0$ набуває при холостому ході і короткому замиканні:

$$I = 0, P_2 = 0, I = I_K, P_2 = U_1 I_K - I_K^2 R_L = \frac{U_1 U_1}{R_L} - \frac{U_1^2 R_L}{R_L^2} = 0. \quad (2.8)$$

У першому випадку струм $I = 0$, а у другому напруга $U_2 = 0$. Максимальне значення потужності, що може бути передане по лінії від джерела до приймача, має місце при значенні струму $I = \frac{I_K}{2}$.

Досліджуючи криву $P_2 = f(I)$, визначають, при якому значенні струму вона досягає максимального значення:

$$\frac{dP_2}{dI} = \frac{d(U_1 I - I^2 R_L)}{dI} = U_1 - 2IR_L = 0, \quad (2.9)$$

$$U_1 = 2IR_L, I = \frac{U_1}{2R_L} = \frac{I_K}{2}.$$

Таким чином, P_2 набуває свого максимального значення $P_{2\max}$ при струмові, який дорівнює половині значення струму короткого замикання, при цьому опір приймача R_H дорівнює опору R_L лінії:

$$I = \frac{U_1}{2R_L} = \frac{U_1}{R_L + R_H}. \quad (2.10)$$

Виходячи з цього, визначаємо максимальне значення потужності, що може бути передане по лінії від джерела до приймача:

$$P_{2\max} = U_1 \frac{I_K}{2} - \frac{I_K^2}{4} R_L = \frac{I_1^2}{2R_L} - \frac{I_1^2}{4R_L} = \frac{I_1^2}{4R_L}. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт корисної дії лінії передачі η визначається як відношення потужності приймача P_2 до потужності джерела P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_1 I - I^2 R_L}{U_1 I} = 1 - \frac{IR_L}{U_1}. \quad (2.12.)$$

Закон змін ККД від струму наведено на рис. 2.2.

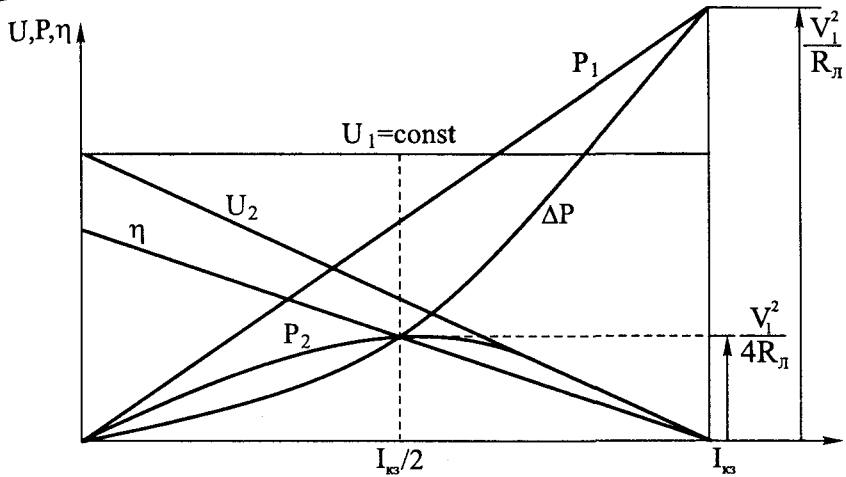


Рис. 2.2

При $U_1 = \text{const}$ і $R_{л} = \text{const}$ ККД зменшується із збільшенням струму у лінії, тобто $\eta = 1$ при холостому ході лінії ($I = 0$) і $\eta = 0$ при короткому замиканні лінії ($I = I_{кз}$).

У режимі передачі максимальної потужності від джерела до приймача, коли $R_{н} = R_{л}$, коефіцієнт корисної дії дорівнює $\eta = 0,5$. Це означає, що тільки 50% потужності джерела електричної енергії використовується приймачем, а решта потужності витрачається на нагрівання проводів і являє собою втрати потужності у лінії. При невеликих потужностях, що передаються по лініях (лінії зв'язку, пристрої автоматики), ККД не має практичного значення: головне для цих ліній – отримання максимальної потужності у приймача. Досягається це шляхом зрівнювання або узгодження опорів лінії і приймача.

2.3. Програма роботи

2.3.1. Провести дослідження фізичної моделі лінії передачі постійного струму при незмінній напрузі на початку лінії.

2.4. Необхідне обладнання

- | | |
|-----------------------------|---------|
| 2.4.1. Лабораторний стенд | – 1 шт. |
| 2.4.2. Реостат | – 1 шт. |
| 2.4.3. Вольтметр | – 2 шт. |
| 2.4.4. Амперметр | – 1 шт. |
| 2.4.5. З'єднувальні проводи | – 1 шт. |

Примітка: при складанні схеми резистори R_1 і R_2 на лабораторному стенді моделюють опори проводів лінії, а резистор R_3 – навантаження.

2.5. Порядок виконання роботи

2.5.1. Після збирання схеми (рис. 2.3) та її перевірки викладачем, встановлюють задану напругу на початку лінії і під час досліду підтримують це значення однаковим за допомогою реостата.

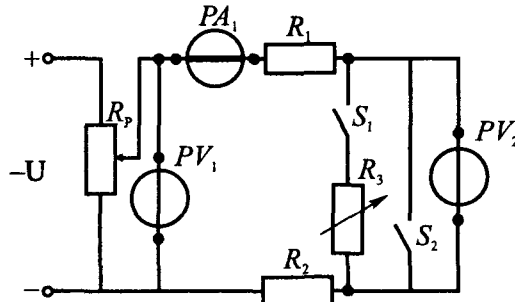


Рис. 2.3

2.5.2. Дослід починають із холостого ходу, коли вимикачі S_1 і S_2 вимкнені.

2.5.3. Вмикають вимикач S_1 і, збільшуючи навантаження, записують покази приладів в таблицю 2.1. Останнє вимірювання роблять при короткому замиканні у кінці лінії, вмикаючи вимикач S_2 .

Таблиця 2.1

U	I	U_1	U_2	P_1	P_2	ΔP	η
В	А	В	В	Вт	Вт	Вт	д.о.

Опори резисторів R_1 і R_2 визначають за даними при короткому замиканні у кінці лінії.

2.5.4. Використовуючи дані досліду і розрахунків, будують криві залежностей

$$U_2 = f(I), P_1 = f(I), P_2 = f(I), \Delta P = f(I), \eta = f(I).$$

2.6. Зміст звіту

2.6.1. Мета роботи.

2.6.2. Необхідне обладнання.

Лабораторні роботи

2.6.3. Електрична схема кола, що досліджується.

2.6.4. Таблиці з дослідженими і розрахованими даними.

2.6.5. Графіки залежностей

$$U_2 = f(I), P_1 = f(I), P_2 = f(I), \Delta P = f(I), \eta = f(I).$$

2.6.6. Висновки.

2.7. Контрольні запитання

2.7.1. За рахунок чого відбуваються втрати потужності в лінії?

2.7.2. При якому значенні струму потужність найбільша і чому?

2.7.3. Що називається коефіцієнтом корисної дії споживача, і як він залежить від струму?

2.7.4. Що таке узгоджене навантаження і в яких лініях використовується такий режим роботи?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНОГО ОПОРУ, ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ

3.1. Мета роботи

В електричному колі з послідовним з'єднанням резистора котушки, індуктивності та конденсатора експериментально перевірити закон Ома, набути навиків у побудові векторних діаграм та визначенні параметрів кола. Дослідити резонанс напруг.

3.2. Основні теоретичні положення

Якщо у коло змінного струму послідовно увімкнути резистор з активним опором R_r , котушку індуктивності з активним R_L та індуктивним X_L опорами та конденсатор з ємнісним опором X_C (активним опором конденсатора нехтуємо: $R_C = 0$), то на цих опорах отримуємо відповідні падіння напруг (рис. 3.1):

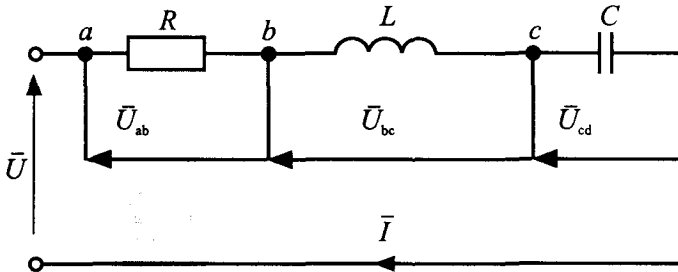


Рис. 3.1

$$\bar{U}_{ad} = \bar{U}_{ab} + \bar{U}_{bc} + \bar{U}_{cd}, \quad (3.1)$$

$$u = u_R + u_L + u_C.$$

Діюче значення струму у колі буде дорівнювати:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R_r + R_L)^2 + (X_L - X_C)^2}}, \quad (3.2)$$

$$R = R_r + R_L.$$

Кут зсуву напруги на затискачах кола відносно струму знаходимо

Лабораторні роботи

зі співвідношення опорів:

$$\varphi = \arccos \frac{R_r + R_L}{\sqrt{(R_r + R_L)^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (3.3)$$

Якщо для такого кола побудувати векторну діаграму, то вона буде мати вигляд, показаний на рис. 3.2.

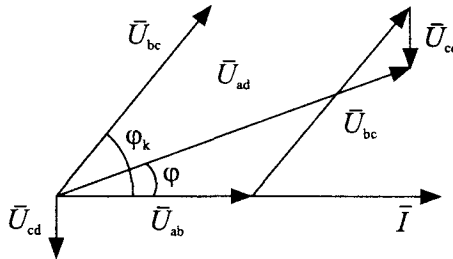


Рис. 3.2

При побудові векторної діаграми за базову вісь взято вектор струму \bar{I} , величина якого залишається незмінною при проходженні через всі опори у нерозгалуженому колі. Потім із початку вектора \bar{I} в напрямі, що збігається зі струмом, відкладаємо вектор спаду напруги на активному опорі \bar{U}_{ab} . Вектор спаду напруги на котушці \bar{U}_{bc} випереджає

струм на кут $\varphi_k = \arctg \frac{X_L}{R_L}$. Вектор спаду напруги на ємності відстає від струму за фазою на 90° . Як видно з векторної діаграми, напруга \bar{U}_{ad} випереджає струм на кут

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}, (X_L > X_C).$$

Слід нагадати, що кут φ може бути як додатнім, так і від'ємним залежно від співвідношення реактивних опорів у колі.

Для знаходження параметрів електричного кола з послідовним з'єднанням резистора, котушки індуктивності та конденсатора можна скористатися наступними формулами:

$$Z_{ad} = \frac{U_{ad}}{I}; R_{ad} = \frac{P}{I^2}; Z_{bc} = \frac{U_{bc}}{I} = Z_L; \quad (3.4)$$

$$Z_{cd} = \frac{U_{cd}}{I} = X_C; R_{ab} = \frac{U_{ab}}{I}; R_L = R_{ad} - R_{ab};$$

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; L = \frac{X_L}{\omega}; C = \frac{1}{\omega X_C}; \cos \varphi = \frac{P}{U_{ad} I};$$

$$\omega = 2\pi f$$

де I, U, P – покази приладів.

У колі змінного струму з послідовним з'єднанням R, X_L та X_C може бути випадок, коли $X_L = X_C$. При цьому $U_L = U_C$. Таке явище називають резонансом напруг. При резонансі напруг у колі буде найбільший струм, так як його загальний опір зменшиться і дорівнюватиме активному опору, так як $X_L - X_C = 0$:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R, \text{ а } I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}. \quad (3.5)$$

При відхиленні від резонансних умов струм у колі зменшується, тому що до активного опору додається опір реактивний. Резонанс напруг можна отримати, змінюючи одну з трьох величин: індуктивність L , ємність C або частоту ω . Частоту, за якої настає резонанс при певних L і C , знаходять з умови $X_L = X_C$:

$$X_L = \omega L; X_C = \frac{1}{\omega C}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.6)$$

Частоту ω_0 називають резонансною, або власною частотою електричного кола.

Загальна потужність кола при резонансі напруг дорівнює активній потужності. Кут φ між струмом і прикладеною напругою дорівнює нулю, а коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 1$.

Незважаючи на те, що реактивна потужність всього кола дорівнює нулю: $Q_L - Q_C = 0$, запас енергії у магнітному полі котушки та електричному полі конденсатора існує, так як $X_L \neq 0$ і $X_C \neq 0$; $Q_L = Q_C = I^2 X_L = I^2 X_C$. При цьому котушка і конденсатор обмінюються енергією. Водночас між котушкою і мережею, а також між конденсатором і мережею обміну енергією не відбувається. З мережі надходить тільки енергія, яка потрібна для покриття втрат в активному опорі.

Лабораторні роботи

Зауважимо, що при резонансі напруг на реактивних опорах можуть виникнути напруги, які перевищують напругу мережі.

$$\text{Дійсно, } U_L = U_C = IX_L, \text{ але } I = \frac{U}{R},$$

$$\text{тоді } U_L = \frac{X_L}{R} U. \quad (3.7)$$

Отже, напруга на котушці і на конденсаторі буде перевищувати напругу джерела в стільки разів, у скільки разів їх реактивний опір більший за активний опір кола.

3.3. Програма роботи

На фізичній моделі провести дослідження розподілу напруг у колі змінного струму з послідовним з'єднанням активного опору, котушки і конденсатора, а також явища резонансу напруг.

3.4. Необхідне обладнання

- | | |
|------------------------------|---------|
| 3.4.1. Змінний резистор | – 1 шт. |
| 3.4.2. Котушка індуктивності | – 1 шт. |
| 3.4.3. Змінний конденсатор | – 1 шт. |
| 3.4.4. Ватметр | – 1 шт. |
| 3.4.5. Вольтметр | – 2 шт. |
| 3.4.6. Амперметр | – 1 шт. |

3.5. Порядок виконання роботи

3.5.1. Зібрати схему згідно рис. 3.3.

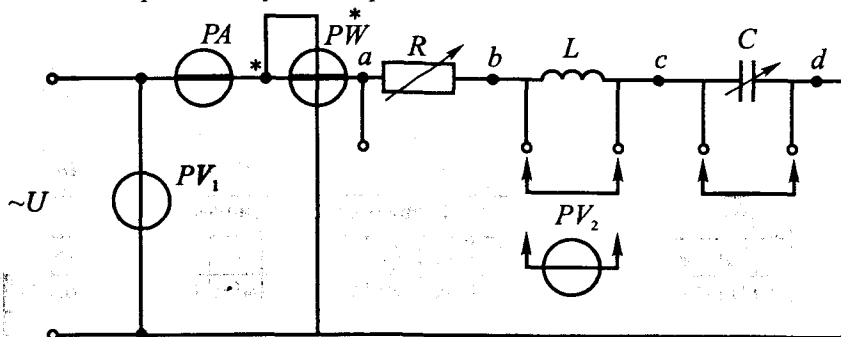


Рис. 3.3

3.5.2. Підключити коло до джерела і перевірити роботу усіх увімкнених приладів.

3.5.3. Дослідити електричне коло змінного струму з увімкненим активним опором, для чого в схемі перемикачами замкнути точки $b - c$ і $c - d$. Зняти покази усіх вимірювальних приладів і записати їх у таблицю 3.1.

3.5.4. Дослідити електричне коло змінного струму з послідовним з'єднанням активного опору і котушки індуктивності, для чого в схемі перемичкою замкнути точки $c - d$. Зняти покази усіх вимірювальних приладів і записати їх в таблицю 3.1.

3.5.5. Дослідити електричне коло змінного струму з послідовним з'єднанням активного опору і конденсатора, для чого в схемі перемикачем з'єднати точки $b - c$. Зняти покази усіх приладів і записати їх у таблицю 3.1.

3.5.6. Дослідити електричне коло змінного струму з послідовним з'єднанням активного опору, котушки індуктивності і конденсатора, для чого в схемі точки $b - c$ і $c - d$ не замикаються накоротко. Зняти покази усіх вимірювальних приладів і записати їх у таблицю 3.1.

3.5.7. За показами вимірювальних приладів побудувати векторні діаграми для усіх досліджень.

3.5.8. Дослідити резонанс напруг, для чого в схемі по п. 3.5.6 змінювати ємність конденсатора від нуля до максимуму і занести дані в таблицю 3.2.

3.5.9. За даними таблиці 3.2 побудувати резонансні криві

$$I = f(C), U_{ab} = f(C), U_{bc} = f(C), U_{cd} = f(C).$$

3.5.10. Зробити висновки по роботі.

Таблиця 3.1

Опір кола	Покази приладів						Розраховані параметри кола											
	I	U_{ad}	U_{ab}	U_{bc}	U_{cd}	P	Z_{ad}	Z_{κ}	R_{ad}	R_{ab}	R_{κ}	X_L	L	X_C	C	$\cos\varphi$	φ	
	А	В	В	В	В	Вт	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	мГн	Ом	мкФ	д.о.	гр	
R																		
R,L																		
R,C																		
R,L,C																		

Таблиця 3.2

№ п.п	Покази приладів					Обчислено	
	I А	U_{ad} В	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{cd} В	P Вт	C мкФ
1							
2							
3							
4							
5							

3.6. Зміст звіту

3.6.1. Мета роботи.

3.6.2. Необхідне обладнання.

3.6.3. Електрична схема кола, що досліджується.

3.6.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

3.6.5. Резонансні криві $I = f(C)$, $U_{ab} = f(C)$, $U_{bc} = f(C)$, $U_{cd} = f(C)$.

3.6.6. Висновки.

3.7. Контрольні запитання

3.7.1. Які опори називаються активними, а які реактивними?

3.7.2. Як залежать індуктивний і ємнісний опори від частоти?

3.7.3. Який вигляд мають трикутники опорів для активно-індуктивного і активно-ємнісного кіл?

3.7.4. Як знаходиться зсув фаз між струмом і напругою в колі змінного струму з послідовним з'єднанням $R - L - C$?

3.7.5. Як формулюється закон Ома для кола змінного струму з послідовним з'єднанням $R - L - C$?

3.7.6. Які умови виникнення резонансу напруг і які співвідношення основних електричних величин у цьому режимі?

3.7.7. Як будують векторні діаграми для розрахунку електричних кіл з послідовним з'єднанням $R - L - C$?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНОГО ОПОРУ, ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ

4.1. Мета роботи

Перевірити експериментально перший закон Кірхгофа і закон Ома для кола змінного струму з паралельним з'єднанням активного опору, котушки та конденсатора. Набути навиків у побудові векторних діаграм і визначенні параметрів такого кола. Дослідити резонанс струмів і вплив зміни ємності на величину коефіцієнта потужності в колі.

4.2. Основні теоретичні положення

На відміну від кіл змінного струму з послідовним з'єднанням R , L , C , де струм в усьому колі однаковий, у паралельних колах однаковою буде напруга, що прикладена до всіх паралельних віток.

Для паралельного кола (рис. 4.1) можна скласти рівняння

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = \bar{I}, \quad (4.1)$$

яке виражає перший закон Кірхгофа. Для миттєвих значень $i_1 + i_1 + i_1 = i$.

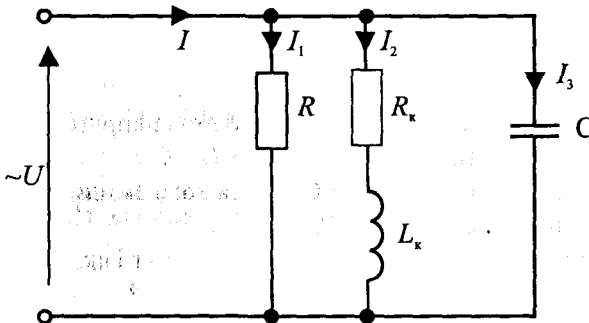


Рис. 4.1

Для кола змінного струму з паралельним з'єднанням елементів закон Ома зручніше виразити не через опори кола, як це робиться у послідовному колі, а через його провідності.

У загальному вигляді для кола змінного струму з послідовним з'єднанням R , L і C закон Ома можна записати виразом:

$$I = UY = U \sqrt{(g_r + g_k)^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (4.2)$$

Лабораторні роботи

а кут зсуву фаз між загальним струмом I і напругою U визначається за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{g_r + g_k}{Y}, \quad (4.3)$$

де Y – повна провідність кола;

g_r і g_k – активні провідності паралельних віток;

b_L і b_C – реактивні провідності паралельних віток.

На рис. 4.2 показана векторна діаграма діючих значень струмів для схеми рис. 4.1. На рис. 4.3 побудований трикутник струмів.

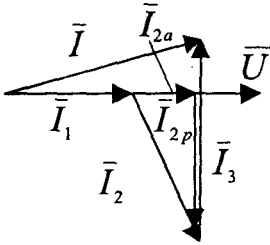


Рис. 4.2

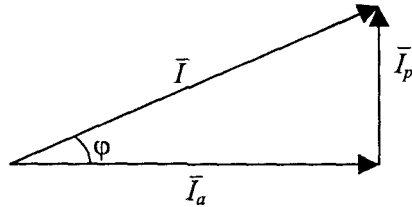


Рис. 4.3

Із трикутника струмів можна скласти важливі співвідношення:

$$I_a = I \cos \varphi; \operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a}; I_p = I_L - I_C = I \sin \varphi; I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (4.4)$$

де I_a – активна складова загального струму;

I_p – реактивна складова загального струму;

I – загальний струм, тобто струм у нерозгалуженій ділянці електричного кола:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a},$$

де: I_{1a} – активна складова струму першої паралельної вітки кола.

I_{2a} – активна складова струму другої паралельної вітки кола.

Із трикутника струмів знайдемо трикутник провідностей, поділивши значення струмів, що складають його сторони, на величину напруги U (рис. 4.4), тобто

$$\frac{I_a}{U} = g; \quad \frac{I_p}{U} = b; \quad \frac{I}{U} = Y = \frac{1}{Z}, \quad (4.5)$$

де g , b і Y – відповідно активна, реактивна і повна провідності кола.

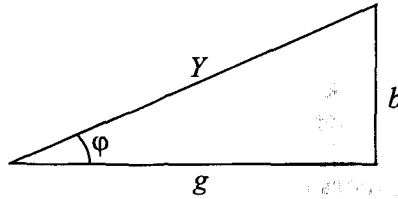


Рис. 4.4

Із трикутника провідностей маємо:

$$\cos \varphi = \frac{g}{Y}; g = Y \cos \varphi; b = Y \sin \varphi; b = b_L - b_C; Y = \sqrt{g^2 + b^2}. \quad (4.6)$$

Якщо у формулу (4.6) підставити в $Y = \frac{1}{Z}$ (4.5), а з трикутника опорів

$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$; $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$, то матимемо провідності, подані через опори:

$$g = \frac{R}{Z^2}; b = \frac{X}{Z^2}, \quad (4.7)$$

де $X = X_L - X_C$ – повний реактивний опір вітки,

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – повний опір.

Із виразів (4.5) і (4.7) видно, що тільки повний опір кола Z і повна провідність Y є оберненими величинами, тоді як опір R і активна провідність g , а також реактивний опір X і реактивна провідність b –

необернені величини, тільки при $X = 0$, $g = \frac{1}{R}$ і при $R = 0$, $b = \frac{1}{X}$.

Із трикутника струмів легко отримати трикутник потужностей (рис. 4.5), помноживши значення струмів на величину прикладеної напруги. З трикутника потужностей отримаємо вже відомі співвідношення:

– активна потужність

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi; \quad (4.8)$$

– реактивна потужність

$$Q = Q_L - Q_C = S \sin \varphi = UI \sin \varphi;$$

Лабораторні роботи

– повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = UI.$$

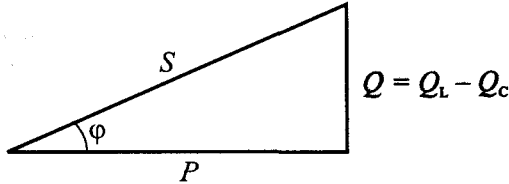


Рис. 4.5

При паралельному з'єднанні активного, індуктивного та ємнісного опорів у колі змінного струму можливий випадок, коли в ньому однакові реактивні провідності $b_L = b_C$, при цьому у вітках будуть протікати однакові реактивні струми: $I_L = I_C$.

Такий режим у колі змінного струму, коли струми у вітках із реактивними опорами однакові, називають резонансом струмів. Так як при резонансі $b_L = b_C$, то повна провідність

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = g,$$

а результуючий струм у колі

$$I = UY = Ug,$$

який є найменшим з усіх можливих робочих струмів.

Отже, результуючий струм у колі при резонансі визначається тільки активною провідністю. Але це не означає, що у вітках з індуктивним і ємнісним опорами (рис. 4.1) немає струму. По кожній із них проходить струм, але ці струми (I_L і I_C) взаємно компенсуються як протилежні за фазою. Якщо у колі немає активного опору, тобто $R = 0$ і $R_L = 0$, то $g = 0$ і результуючий струм дорівнює нулю: $I = Ug = 0$.

При цьому вітками з індуктивним і ємнісним опорами створюється ніби самостійне коло без зовнішнього джерела напруги. У колі відбувається коливальний процес, при якому струм підтримується без зовнішнього джерела. У реальному колі, якщо вимкнути зовнішнє джерело напруги, цей процес швидко згасне, бо в колі завжди $g > 0$, тобто існує активна провідність, в якій витрачається активна енергія, і процес згасне за частки секунди. Резонансну частоту знаходимо з умови, що $b_L = b_C$, тобто (рис. 4.1):

$$\frac{X_L}{Z^2} = \frac{X_C}{Z^2}; \frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{1}{X_C}$$

Звідси

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_L^2}{\rho^2}}, \quad (4.10)$$

$$\text{де } \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Практично резонанс струмів отримують, змінюючи індуктивність або ємність при постійній частоті струму. Явище резонансу струмів широко використовується для підвищення коефіцієнта потужності.

При резонансі струмів між генератором і споживачем протікає тіль-

ки активний струм, який за фазою збігається з напругою $I_a = Ug = \frac{U}{R}$.

Коефіцієнт потужності при цьому дорівнює одиниці. Повна потужність кола дорівнює активній потужності $S = UI_a = P$. Генератор і лінія електропередачі повністю розвантажуються від реактивного струму, що призводить до зменшення втрат енергії і до збільшення ККД передачі.

Щоб визначити в колі змінного струму (рис. 4.6) параметри елементів схеми за показами вимірювальних приладів, можна скористатися наступними формулами:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U}{I}; Y = \frac{1}{Z}; Z_k = \frac{U}{I_2}; Y_k = \frac{I_2}{U}; Z_C = X_C = \frac{U}{I_3}; \\ g &= \frac{P}{U^2} = \frac{I^2}{P}; g_r = \frac{I_1}{U}; g_k = g - g_r; b_L = \sqrt{Y_k^2 - g_k^2}; \\ b_C &= Y_C = \frac{I_3}{U}; R_k = \frac{g_k}{Y_k^2}; X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; L = \frac{X_L}{\omega}; \\ C &= \frac{b_C}{\omega}; \cos \varphi = \frac{P}{UI}; \omega = 2\pi f. \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.3. Програма роботи

На фізичній моделі провести дослідження розподілу струмів у колі змінного струму з паралельним з'єднанням активного опору, котушки і конденсатора, а також явища резонансу струмів.

4.4. Необхідне обладнання

4.4.1. Резистор

4.4.2. Котушка

4.4.3. Конденсатор

4.4.4. Амперметр

4.4.5. Вольтметр

4.4.6. Ватметр

4.4.7. Вимикачі

4.5. Порядок виконання роботи

4.5.1. Зібрати схему згідно рис. 4.6.

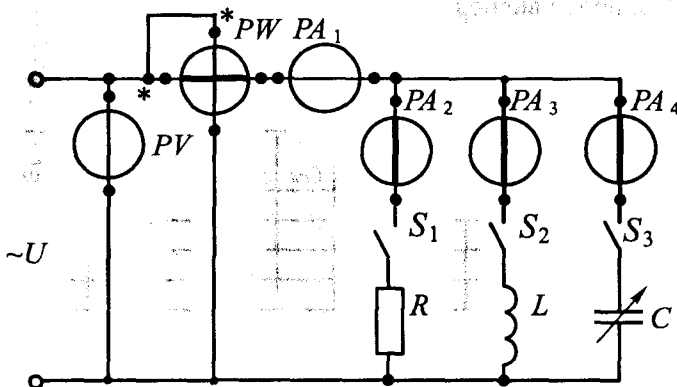


Рис. 4.6

4.5.2. Увімкнути схему під напругу, переконатися в роботі всіх увімкнених приладів.

4.5.3. Дослідити коло змінного струму тільки з активним опором R , для чого замкнути вимикач S_1 , а вимикачами S_2 і S_3 відключити індуктивність і ємність. Дані вимірів і обчислень занести в таблицю 4.1.

4.5.4. Дослідити коло змінного струму з паралельним з'єднанням активного опору і котушки індуктивності. Для цього в схемі вимикачами S_1 і S_2 увімкнути активний опір і котушку індуктивності, а вимикач S_3 розімкнути. Дані вимірів і обчислень записати в таблицю 4.1.

4.5.5. Дослідити коло змінного струму з паралельним з'єднанням активного опору і ємності. Для цього вимикачами S_1 і S_3 увімкнути активний опір і ємність, а вимикач S_2 розімкнути. Дані записати в таблицю 4.1.

4.5.6. Дослідити властивості паралельного активно-індуктивно-ємнісного кола змінного струму. Для цього увімкнути всі вимикачі. Дані вимірів і обчислень занести в таблицю 4.1.

4.5.7. За даними вимірів (таблиця 4.1) побудувати векторні діаграми для усіх досліджених випадків.

4.5.8. Дослідити резонанс струмів, для чого в колі змінного струму з паралельним з'єднанням R , L і C змінювати величину ємності від $C = 0$ до $C = C_{\max}$. Дані вимірів записати в таблицю 4.2.

4.5.9. За даними таблиці 4.2 побудувати резонансні криві

$$I = f(C), I_1 = f(C), I_2 = f(C), I_3 = f(C).$$

4.5.10. Зробити висновки по роботі.

Таблиця 4.1

Дослідли	Заміри						Обчислення										
	U В	P Вт	I А	I_1 А	I_2 А	I_3 А	Z Ом	Y см	ZL Ом	Y см	g_r см	g_k см	b_L см	b_C см	L Гн	C Ф	$\cos\phi$ д.о.
R																	
R, L																	
R, C																	
R, L, C																	

Таблиця 4.2

№ п.п	Заміри						Обчислення
	U В	P Вт	I А	I_1 А	I_2 А	I_3 А	C мкФ
1							
2							
3							
4							
5							

4.6. Зміст звіту

4.6.1. Мета роботи.

4.6.2. Необхідне обладнання.

Лабораторні роботи

4.6.3. Електрична схема кола, що досліджується.

4.6.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

4.6.5. Графіки залежностей $I = f(C)$, $I_1 = f(C)$, $I_2 = f(C)$, $I_3 = f(C)$.

4.6.6. Висновки.

4.7. Контрольні запитання

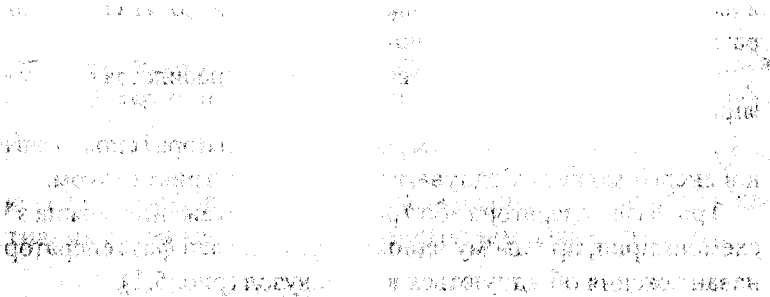
4.7.1. Як записати закон Ома для кола змінного струму з паралельним з'єднанням R , L і C ?

4.7.2. Як записується перший закон Кірхгофа для кола змінного струму з паралельним з'єднанням R , L і C ? Як визначити зсув фаз такого кола?

4.7.3. Як будуються векторні діаграми для різних випадків паралельного з'єднання R , L і C ?

4.7.4. Як визначають активну, реактивну, повну провідності, якщо відомі активний, реактивний і повний опори?

4.7.5. Що називається резонансом струмів і які його властивості?



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ЗІ З'ЄДНАННЯМ ЗІРКОЮ ОДНОФАЗНИХ ДЖЕРЕЛ ТА СПОЖИВАЧІВ

5.1. Мета роботи

Ознайомитися дослідним шляхом із властивостями з'єднання зіркою активних споживачів електричної енергії в колах трифазного струму. Дослідити режими системи з рівномірним і нерівномірним навантаженням фаз, а також з обривом фази. Набути навиків у вимірюванні параметрів трифазної системи і побудові векторних діаграм.

5.2. Основні теоретичні положення

Трифазним струмом називається сукупність трьох однофазних змінних струмів однакової частоти і зсунутих відносно один одного на $1/3$ періоду (120°). Якщо в трифазній системі діють електрорушійні сили, рівні за величиною і зсунуті за фазою на 120° , а повні опори всіх трьох фаз як за величиною, так і за характером однакові, то такий режим називається симетричним. Невиконання однієї з цих умов або обох разом є ознакою несиметричного режиму.

Несиметричний режим створюється, як правило, за рахунок нерівномірного навантаження фаз.

У колах трифазного струму обмотки генератора і споживачі електричної енергії можуть з'єднуватися зіркою або трикутником.

Три фази генератора або три фази навантаження можна з'єднати за схемою зірки, при цьому однойменні затискачі фаз генератора або фаз навантаження об'єднуються в один вузол (рис. 5.1).

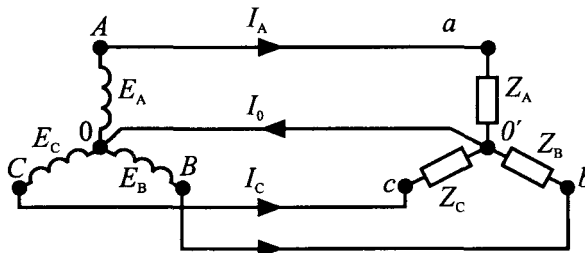


Рис. 5.1

Лабораторні роботи

Точка з'єднання обмоток називається нульовою, а провід, що з'єднує цю точку з нульовою точкою споживачів, називається нульовим.

Три проводи, що з'єднують початки обмоток генератора зі споживачами, називають лінійними.

Система трифазного струму з нульовим проводом називається чотирипровідною.

Напряга між лінійними проводами називається лінійною, а між лінійним і нульовим проводом – фазною.

Струми, які протікають у лінійних проводах, називають лінійними, а струми в фазних обмотках споживача – фазними.

При з'єднанні зіркою лінійний струм є також і фазним струмом $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

Співвідношення між лінійними і фазними напругами при з'єднанні зіркою в загальному вигляді може бути записане такими виразами:

$$\bar{U}_{ab} = \bar{U}_a - \bar{U}_b; \bar{U}_{bc} = \bar{U}_b - \bar{U}_c; \bar{U}_{ca} = \bar{U}_c - \bar{U}_a. \quad (5.1)$$

При рівномірному навантаженні фаз вирази (5.1) об'єднуються в загальне співвідношення:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (5.2)$$

При нерівномірному навантаженні у нульовому проводі з'являється струм, величину якого можна визначити за першим законом Кірхгофа (рис. 5.1):

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c. \quad (5.3)$$

На рис. 5.2 побудовані векторні діаграми напруг і струмів при з'єднанні активних споживачів зіркою з рівномірним навантаженням.

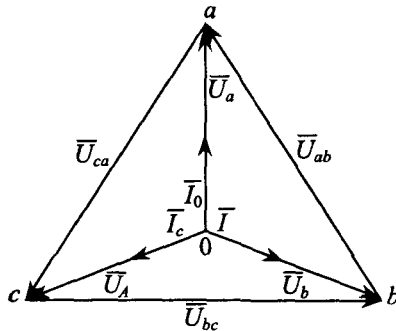


Рис. 5.2

Вектори фазних напруг \bar{U}_a , \bar{U}_b і \bar{U}_c однакові за величиною, але зсунуті на 120° . Вектори лінійних напруг \bar{U}_{ab} , \bar{U}_{bc} і \bar{U}_{ca} є різницею векторів фазних напруг (5.1). Вектори струмів \bar{I}_a , \bar{I}_b , \bar{I}_c збігаються за фазою з векторами відповідних фазних напруг, якщо навантаження суто активне. Струм у нульовому проводі буде відсутнім.

Симетричне навантаження створюють трифазні асинхронні двигуни, трифазні індукційні печі та ін. Але на практиці важко дотримуватися симетричного навантаження, особливо в електричних колах з однофазним побутовим навантаженням.

На рис. 5.3 побудовані векторні діаграми напруг і струмів при з'єднанні активних споживачів зіркою з нерівномірним навантаженням.

Як один із випадків нерівномірного навантаження в чотирипровідній системі можна вважати обрив одного з лінійних проводів ($R = \infty$).

Векторна діаграма для такого випадку показана на рис. 5.4.

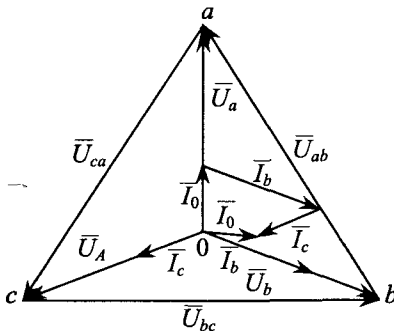


Рис. 5.3

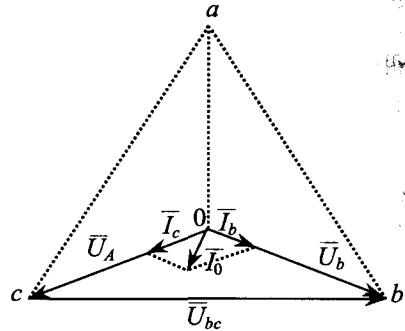


Рис. 5.4

Дійсно, якщо один із лінійних проводів буде обірваний, то не буде напруги і струму на навантаженні, увімкненому в цю фазу, а в фазах, які залишилися під напругою, режим роботи не зміниться.

Режим рівномірного навантаження фаз при з'єднанні споживачів зіркою не викликає появи струму в нульовому проводі, тому при відсутності нульового проводу співвідношення між струмами і напругами в цьому режимі не зміняться. При нерівномірному навантаженні трьох фаз струми в фазах будуть різні, а відсутність нульового проводу, по якому протікав нульовий струм, призведе до того, що падіння напруги на фазах будуть прямо пропорційними опорам фаз. Між нульовими точками

Лабораторні роботи

генератора і споживача в цьому випадку з'явиться напруга $U_{00'}$, яка має назву напруги зміщення нейтралі і пропорційна величині струму, що існував у нульовому проводі до його обриву.

На рис. 5.5 показана векторна діаграма напруг і струмів для випадку нерівномірного активного навантаження трьох фаз без нульового проводу. Трикутник лінійних напруг залишається без зміни, а зірку фазних напруг і точку O' знаходять методом засічок із вершин трикутника лінійних напруг.

При обриві фази A ($Z_A = \infty$) і при відсутності нульового проводу фаза B і фаза C з'єднуються послідовно. Фазні струми I_b і I_c в цьому випадку будуть однаковими, а фазні напруги будуть прямо пропорційні величинам фазних опорів. Тому на векторній діаграмі (рис. 5.6) точка O' переміститься на вектор лінійної напруги U_{bc} і поділить його на частини, рівні фазним напругам U_b і U_c .

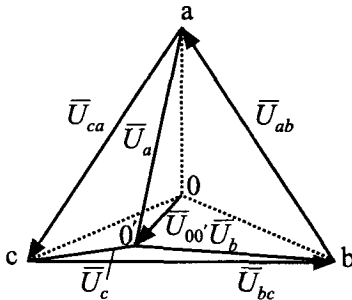


Рис. 5.5

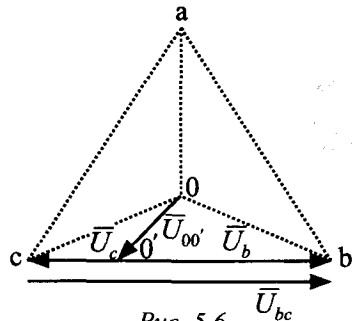


Рис. 5.6

У колах трифазного струму активна потужність в загальному вигляді може бути знайдена як сума активних потужностей окремих фаз:

$$P_{3\phi} = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c. \quad (5.4)$$

При рівномірному навантаженні, коли $Z_a = Z_b = Z_c$ і $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$, активна потужність трифазного струму знаходиться за формулою:

$$P_{3\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi. \quad (5.5)$$

5.3. Програма роботи

5.3.1. Дослідити режими трифазної системи з рівномірним і нерівномірним навантаженням при з'єднанні споживачів зіркою, побудувати векторні діаграми.

5.4. Необхідне обладнання

5.4.1. Змінні резистори	– 3 шт.	
5.4.2. Амперметр	– 2 шт.	
5.4.3. Вольтметр	– 1 шт.	
5.4.4. Ватметр	– 1 шт.	

5.5. Порядок виконання роботи

5.5.1. Зібрати схему згідно рис. 5.7.

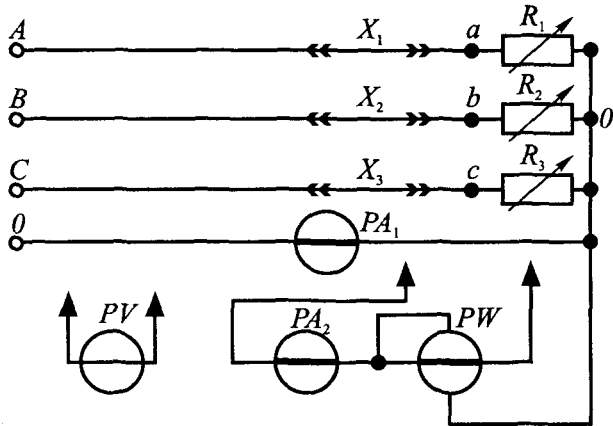


Рис. 5.7

5.5.2. Перевірити роботу кола під напругою.

5.5.3. Встановити рівномірне навантаження фаз (всі опори увімкнені), заміряти струми, потужності і напруги. Дані вимірів занести в таблицю 5.1 (режим “а”).

5.5.4. Встановити нерівномірне навантаження на трьох фазах. Заміряти струми, напруги і потужності і занести дані в графу “б” таблиці 5.1.

5.5.5. Відключенням одного із лінійних проводів від джерела живлення створити обрив однієї фази. Провести усі виміри і дані занести в графу “в” таблиці 5.1.

5.5.6. Дослідження режимів по п. 5.5.3–5.5.5 слід повторити з вимкненим нульовим проводом, результати вимірів занести у таблицю 5.1.

5.5.7. За даними вимірів побудувати векторні діаграми напруг і струмів для всіх випадків дослідження.

5.6. Зміст звіту

5.6.1. Мета роботи.

Лабораторні роботи

Таблиця 5.1

Режим роботи	Обчислення																	
	Заміри						З досліду						З діаграми					
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	$U_{00'}$	I_a	I_b	I_c	I_o	P_a	P_b	P_c	R_a	R_b	R_c	$P_{3\phi}$	$P_{3\phi}$	I_0	$U_{00'}$
З нульовим проводом	а	б	в															
Без нульового проводу	а	б	в															
	б																	
	в																	

5.6.2. Необхідне обладнання.

5.6.3. Електрична схема кола, що досліджується.

5.6.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

5.6.5. Векторні діаграми напруг і струмів.

5.6.5. Висновки.

5.7. Контрольні запитання

1. Яке з'єднання називається з'єднанням зіркою та які його особливості?

2. Як будується векторна діаграма для струмів і напруг при з'єднанні зіркою?

3. В якому випадку немає струму в нульовому проводі і чому?

4. Яка роль нульового проводу в чотирипровідній системі?

5. Які особливості режиму роботи споживачів, з'єднаних зіркою при рівномірному навантаженні фаз із нульовим проводом і без нього?

6. Режим обриву фаз і його особливості при з'єднанні споживачів зіркою з нульовим проводом і без нього?

7. Як вимірюється потужність у колах трифазного струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ, З'ЄДНANOЇ ТРИКУТНИКОМ

6.1. Мета роботи

Ознайомитися на практиці зі з'єднанням трикутником активних споживачів електричної енергії в колах трифазної системи. Дослідити режими рівномірного і нерівномірного навантаження фаз, а також режими обриву фази і обриву лінійного проводу.

6.2. Основні теоретичні положення

Якщо обмотки генератора трифазного струму з'єднати так, що кінець першої обмотки (K_1) буде з'єднаний із початком другої (Π_2), кінець другої (K_2) — з початком третьої (Π_3) і кінець третьої (K_3) — з початком першої (Π_1), а до точок з'єднання обмоток підключити лінійні проводи, то отримаємо з'єднання трикутником (рис. 6.1). Іншими словами, з'єднання трикутником отримуємо, коли споживачі (або обмотки генератора) вмикаються між лінійними проводами трифазної системи.

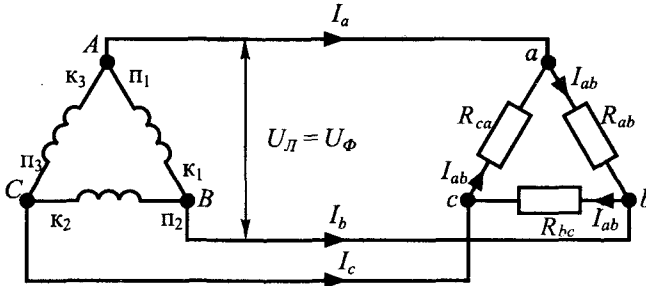


Рис. 6.1

На відміну від з'єднання зіркою, де застосовується в більшості випадків чотирипровідна система, при з'єднанні трикутником застосовується трипровідна система як при рівномірному, так і при нерівномірному навантаженні.

При з'єднанні трикутником лінійні напруги U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} будуть також фазними U_a , U_b , U_c , так як напруга між лінійними проводами є напругою між початком і кінцем однієї фази (обмотки), тобто

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (6.1)$$

Лабораторні роботи

Співвідношення між лінійними (I_a, I_b, I_c) і фазними (I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}) струмами в загальному вигляді легко може бути отримане, якщо для кожної вузлової точки споживача застосувати перший закон Кірхгофа:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}; \bar{I}_b = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}; \bar{I}_c = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}. \quad (6.2)$$

Таким чином, лінійні струми становлять геометричну різницю фазних струмів. У тому випадку, коли при з'єднанні трикутником навантаження буде рівномірним, усі фазні струми будуть рівні між собою, то і лінійні струми будуть рівні. Тоді співвідношення між лінійними і фазними струмами буде

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}. \quad (6.3)$$

На рис. 6.2 показана векторна діаграма струмів і напруг, побудована для випадку нерівномірного активного навантаження.

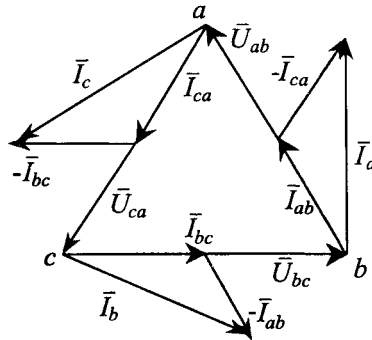


Рис. 6.2

Із рисунка видно, що вектори лінійних (вони ж і фазні) напруг створюють рівносторонній трикутник. Фазні струми збігаються за фазою з напругою, так як має місце активне навантаження, і можуть бути знайдені за законом Ома:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{R_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{R_{ca}}. \quad (6.4)$$

Лінійні струми знаходяться як геометрична різниця фазних струмів за формулами (6.2).

Режим роботи трифазної системи при обриві фази споживача аналогічний відсутності навантаження в фазі. В цьому випадку фазні струми в "цілих" фазах не зміняться. Так, наприклад, якщо $I_{ab} = 0$, то лінійні струми I_a та I_b зменшуються і стають рівними відповідним фазним струмам $I_a = I_{ca}$; $I_b = I_{bc}$. Лінійний струм I_c при цьому залишається без зміни. Цей режим легко проілюструвати векторною діаграмою (рис. 6.3), а також аналогічно, якщо в систему рівнянь (6.2) підставити значення $I_{ab} = 0$.

На рис. 6.4 подана векторна діаграма для випадку, коли обірвано лінійний провід першої фази ($I_a = 0$), а опори трьох фаз активні і різні за величиною.

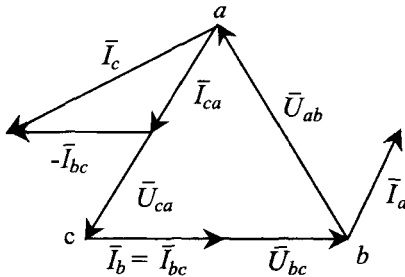


Рис. 6.3

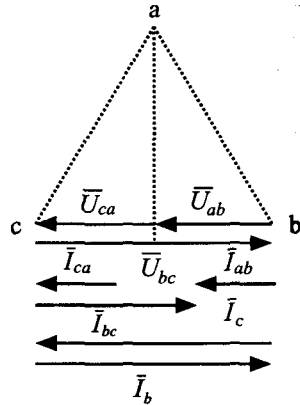


Рис. 6.4

У цьому випадку будуть вірні співвідношення :

$$\begin{aligned}
 U_{ca} + U_{ab} &= U_{bc}; \quad I_b = I_{bc} + I_{ab}; \quad I_c = I_{ca} + I_{bc}, \\
 I_{ab} = I_{ca} &= \frac{U_{bc}}{R_{ab} + R_{ca}}.
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

6.3 Порядок виконання роботи

6.3.1. Зібрати коло згідно схеми на рис. 6.5.

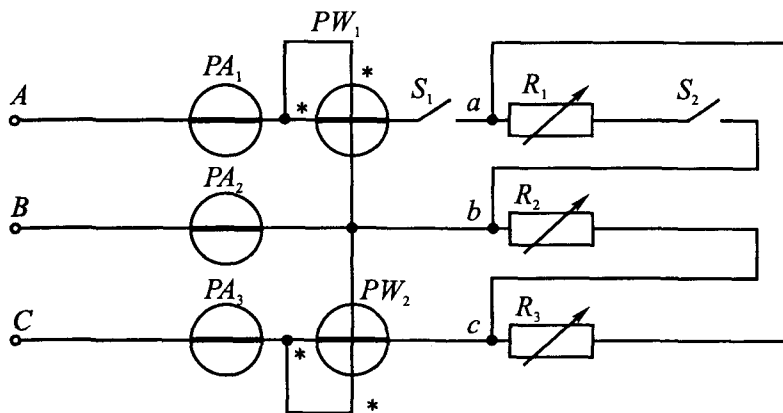


Рис. 6.5

6.3.2. Увімкнути схему під напругу, перевірити роботу усіх увімкнених приладів.

6.3.3. При рівномірному навантаженні заміряти лінійні і фазні струми, лінійні напруги, потужність трифазного кола методом двох ватметрів. Дані вимірів записати у рядок "а" таблиці 6.1.

6.3.4. Увімкнувши різні опори в кожену фазу, дослідити особливості режиму при нерівномірному навантаженні. Заміряти усі величини і записати їх у рядок "б" таблиці 6.1.

6.3.5. Вимикач S_2 розімкнути і дослідити режим роботи даної схеми при відсутності в одній із фаз навантаження. Дані записати у рядок "в" таблиці 6.1.

6.3.6. При нерівномірному навантаженні в фазах дослідити роботу трифазної системи з обірваним одним лінійним проводом. Для цього необхідно вимкнути вимикач S_1 . Дані вимірів занести у рядок "г" таблиці 6.1.

6.3.7. За даними вимірів підрахувати активні опори і потужності кожної фази, а також сумарну потужність трифазного кола для усіх випадків.

6.3.8. Використовуючи дані вимірів, побудувати векторні діаграми для усіх випадків дослідження.

Таблиця 6.1

Режим роботи	З а м і р и										
	I_a А	I_b А	I_c А	I_{ab} А	I_{bc} А	I_{ca} А	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В	P_1 Вт	P_2 Вт
а											
б											
в											
г											

О б ч и с л е н н я								
	R_{ab} Ом	R_{bc} Ом	R_{ca} Ом	P_{ab} Вт	P_{bc} Вт	P_{ca} Вт	ΣP Вт	P_1+P_2 Вт
а								
б								
в								
г								

6.4. Зміст звіту

6.4.1. Мета роботи.

6.4.2. Необхідне обладнання.

6.4.3. Електрична схема кола, що досліджується.

6.4.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

6.4.5. Векторні діаграми напруги струмів.

6.4.6. Висновки.

6.5. Контрольні запитання

6.5.1. Яке з'єднання споживачів називається трикутником?

6.5.2. Яке співвідношення між лінійними і фазними струмами, лінійними і фазними напругами при рівномірному і нерівномірному навантаженні при з'єднанні трикутником?

6.5.3. Як будуються векторні діаграми при рівномірному і нерівномірному активному навантаженні?

6.5.4. Які особливості режиму відсутності навантаження на одній із фаз? Як будується векторна діаграма для такого випадку?

6.5.5. Як будуються векторні діаграми для активно-індуктивного та активно-ємнісного навантаження?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. ВИПРОБОВУВАННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

7.1. Мета роботи

Вивчити будову і принцип дії трансформатора, випробувати його шляхом проведення дослідів холостого ходу, навантаження та короткого замикання, побудувати зовнішню характеристику трансформатора.

7.2. Основні теоретичні положення

Трансформатор складається із замкнутого сталюого осердя магнітопроводу, на якому розміщені дві обмотки: низької напруги і високої напруги. Вони електрично не з'єднані та ізольовані між собою (рис. 7.1).

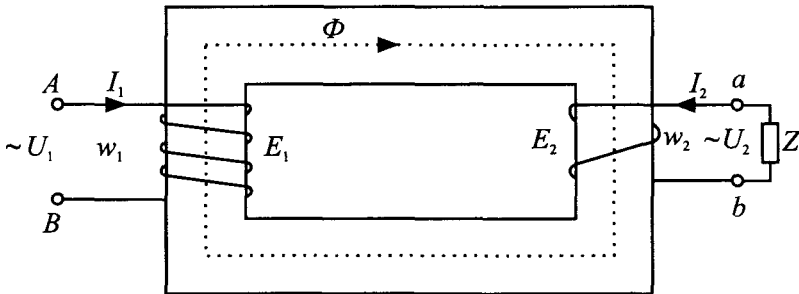


Рис. 7.1

По первинній обмотці w_1 тече струм I_1 , який створює магнітний потік Φ , більша частина якого замикається по сталюму осердю. Цей потік індукуює в первинній і вторинній обмотках трансформатора е.р.с., діючі значення яких дорівнюють:

$$E_1 = 4,44w_1\Phi f; \quad E_2 = 4,44w_2\Phi f. \quad (7.1)$$

Відношення E_1 і E_2 називається коефіцієнтом трансформації і визначається за формулою:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}}, \quad (7.2)$$

де U_{10} та U_{20} – відповідно напруги на первинній та вторинній обмотках при холостому ході.

Дослід холостого ходу проводять при розімкненій вторинній обмотці ($I_2 = 0$) і номінальній первинній напрузі ($U_1 = U_{\text{ном}}$). У цьому досліді $P_2 = 0$, а тому ватметр, увімкнений у первинне коло, вимірює втрати холостого ходу. Оскільки при холостому ході втрати в міді майже дорівнюють нулю, то втрати холостого ходу є втратами в сталі:

$$P_{\text{ХХ}} = P_{\text{СТ}}. \quad (7.3)$$

Втрати в сталі $P_{\text{СТ}}$ або магнітні втрати, – це втрати на гістерезис і вихрові струми в сталевому осерді:

$$P_{\text{СТ}} = P_{\text{Г}} + P_{\text{В.С.}}. \quad (7.4)$$

З емпіричної формули відомо, що втрати на гістерезис і вихрові струми пропорційні квадрату магнітної індукції або квадрату магнітного потоку:

$$P_{\text{СТ}} \equiv B^2 \text{ або } P_{\text{СТ}} \equiv \Phi^2, \quad (7.5)$$

а потік пропорційний прикладеній напрузі U_1 , тому

$$P_{\text{СТ}} \equiv U_1^2. \quad (7.6)$$

Із досліді холостого ходу (рис. 7.2) визначають також струм холостого ходу I_0 і кут магнітного запізнення δ :

$$\delta = \arcsin \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}}. \quad (7.7)$$

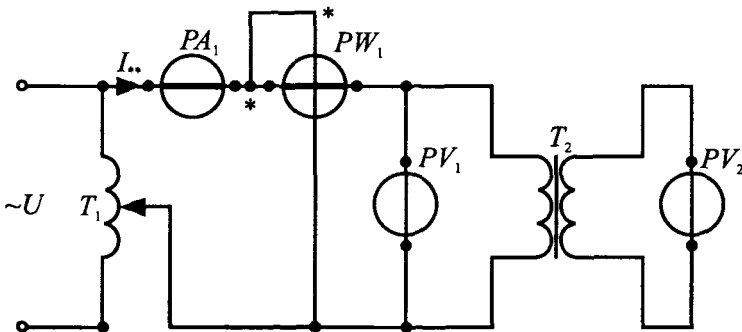


Рис. 7.2

Крім втрат у сталі є ще втрати в міді. Їх визначають із досліду короткого замикання (рис. 7.3).

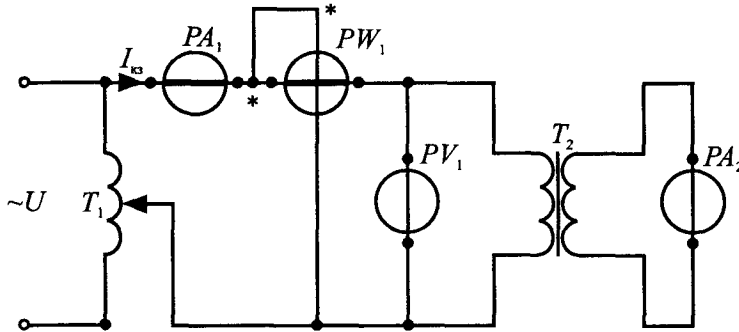


Рис. 7.3

Втрати в міді – це втрати на нагрівання обмоток трансформатора струмами навантаження. Втрати в міді пропорційні квадрату струму навантаження. Із зміною струму навантаження втрати в міді змінюються, тому їх називають змінними.

Дослід короткого замикання проводять при накоротко замкненій вторинній обмотці ($U_2 = 0$); при цьому до первинної обмотки підводять зменшену напругу, так звану напругу короткого замикання $U_1 = U_{кз}$, при якій встановлюються номінальні струми $I_1 = I_{ном}$ і $I_2 = I_{2ном}$. Потужність, споживана трансформатором, дорівнює втратам енергії на нагрівання в міді обмоток при номінальному навантаженні трансформатора, а відносно малими втратами в сталі в цьому разі нехтують:

$$P_{кз} = P_M. \quad (7.8)$$

Із досліду короткого замикання визначають опори первинної і вторинної обмоток трансформатора за формулами:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}; R_1 = \frac{P_1}{I_1^2}; X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}; R_2 = \frac{R_1}{K^2}; X_2 = \frac{X_1}{K^2}. \quad (7.9)$$

У навантаженому трансформаторі струми первинної і вторинної обмоток створюють відповідно свої магнітні потоки $\overline{\Phi}_1$ і $\overline{\Phi}_2$, які проходять по спільному магнітопроводу і створюють результуючий потік $\overline{\Phi}$, що дорівнює їх геометричній сумі, так як потоки $\overline{\Phi}_1$ і $\overline{\Phi}_2$ зсунуті за фазою:

$$\overline{\Phi} = \overline{\Phi}_1 + \overline{\Phi}_2. \quad (7.10)$$

За другим законом Кірхгофа для первинної і вторинної обмоток навантаженого трансформатора можна записати рівняння (рис.7.1):

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 R_1 + \bar{I}_1 X_1; \quad \bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 R_2 - \bar{I}_2 X_2. \quad (7.11)$$

Роботу трансформатора при навантаженні найкраще вивчити за векторною діаграмою (рис. 7.4).

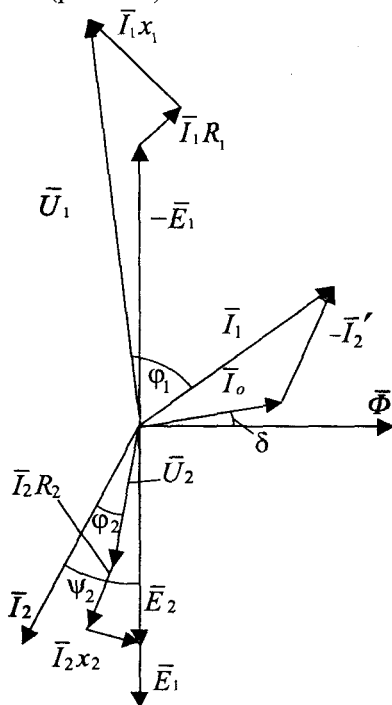


Рис. 7.4

Векторну діаграму навантаженого трансформатора будують у такій послідовності:

1. Горизонтально відкладають вектор магнітного потоку $\bar{\Phi}$, який визначають із рівняння (7.1).
2. Під кутом магнітного запізнення δ відкладають струм холостого ходу \bar{I}_0 .
3. Під кутом 90° вниз від вектора $\bar{\Phi}$ відкладають е.р.с. \bar{E}_1 і \bar{E}_2 , внаслідок відставання їх за фазою.

Лабораторні роботи

4. Під кутом ψ_2 відносно вектора \bar{E}_2 відкладають вектор вторинного струму \bar{I}_2 . Зсув фаз між вторинним струмом \bar{I}_2 і е.р.с. \bar{E}_2 визначають за формулою:

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}. \quad (7.12)$$

5. Згідно з рівнянням $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-\bar{I}'_2)$ знаходять струм у первинній обмотці, для чого до струму холостого ходу \bar{I}_0 додають у зворотному

напрямі зведений струм вторинної обмотки $\bar{I}'_2 = \frac{\bar{I}_2}{K}$.

6. До кінця вектора \bar{E}_2 добудовують трикутник спадів напруг на опорах вторинної обмотки $\bar{I}_2 R_2$ і $\bar{I}_2 X_2$.

Вектор активного спаду напруги $\bar{I}_2 R_2$ спрямовують паралельно струму \bar{I}_2 , а вектор реактивного спаду напруги $\bar{I}_2 X_2$ – перпендикулярно до \bar{I}_2 .

7. До зворотної первинної \bar{E}_1 добудовують трикутник спадів напруг на опорах первинної обмотки (активної $\bar{I}_1 R_1$ – в напрямі струму \bar{I}_1 , реактивної $\bar{I}_1 X_1$ – перпендикулярно до струму \bar{I}_1).

Корисна потужність трансформатора якщо врахувати його завантаження, дорівнюватиме

$$P_2 = \beta S_n \cos \varphi_2, \quad (7.13)$$

де β – відношення дійсного струму навантаження до номінального:

$$\beta = \frac{I}{I_n}. \quad (7.14)$$

ККД трансформатора – це відношення корисної потужності P_2 до всієї підведеної P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_M - P_{CT}}{P_1}. \quad (7.15)$$

Якщо врахувати ступінь завантаження трансформатора, то ККД визначатиметься за такою рівністю:

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi + \beta^2 P_M + P_{CT}} \quad (7.16)$$

Номінальне значення ККД лежить у межах 98-99% для великих трансформаторів, і у межах 50-70% для малих трансформаторів.

7.3. Порядок виконання роботи

7.3.1. Ознайомитися з приладами і обладнанням, необхідним для проведення досліду.

7.3.2. Провести дослід холостого ходу трансформатора. Для цього необхідно в схемі (рис. 7.5) до затискачів вторинної обмотки T_2 увімкнути вольтметр PV_2 . Автотрансформатором T_1 змінювати напругу U_1 від 0 до U_{1H} . Покази усіх приладів записати в таблицю 7.1.

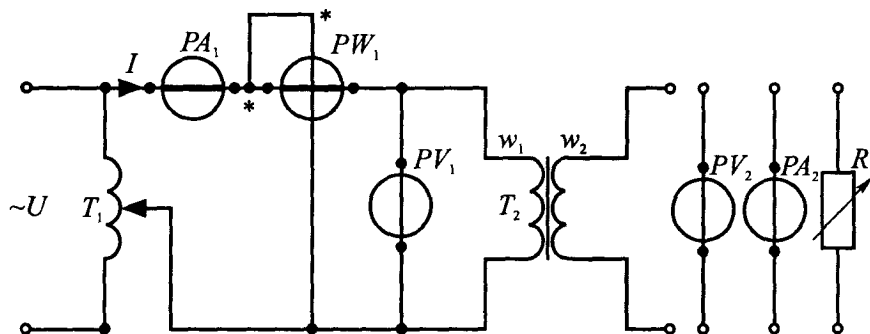


Рис. 7.5

7.3.3. Провести дослід при активному навантаженні. Для цього в схемі (рис. 7.5) до затискачів вторинної обмотки T_2 увімкнути вольтметр PV_2 , а також увімкнути послідовно з'єднані між собою амперметр PA_2 і змінний опір R . Автотрансформатором T_1 встановити напругу $U_1 = U_{1H}$. Змінним опором R змінювати навантаження трансформатора від $I_2 = 0$ до $I_2 = I_{2H}$ (4-5 точок). Покази приладів записати в таблицю 7.1.

7.3.4. Провести дослід короткого замикання. Для цього необхідно трансформатором T_1 установити $U_1 = 0$, затискачі вторинної обмотки замкнути на амперметр PA_2 . Автотрансформатором T_1 змінювати напругу U_1 так,

Лабораторні роботи

щоб струм I_2 змінювався від $I_2 = 0$ до $I_2 = I_{2H}$ (4-5 точок). Покази приладів записати в таблицю 7.1.

7.3.5. За даними досліду холостого ходу визначити коефіцієнт трансформації трансформатора, втрати в сталі і побудувати характеристику холостого ходу.

7.3.6. За даними досліду активного навантаження визначити ККД для усіх режимів навантаження і побудувати зовнішню характеристику трансформатора і векторну діаграму.

7.3.7. За даними досліду короткого замикання визначити втрати в міді і опори первинної і вторинної обмоток трансформатора.

Таблиця 7.1

Режим роботи	U_1 В	I_1 А	P_1 Вт	U_2 В	I_2 А
Холостий хід					
Навантаження					
Коротке замикання					

7.4. Зміст звіту

7.4.1. Мета роботи.

7.4.2. Необхідне обладнання.

7.4.3. Електрична схема кола, що досліджується.

7.4.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

7.4.5. Графік зовнішньої характеристики трансформатора і векторна діаграма.

7.4.6. Висновки.

7.5. Контрольні запитання

- 7.5.1. Пояснити призначення та принцип дії трансформатора.
- 7.5.2. Що таке коефіцієнт трансформації?
- 7.5.3. Які втрати потужності у трансформаторі?
- 7.5.4. Як побудувати векторну діаграму?
- 7.5.5. Запишіть рівняння рівноваги напруг і струмів в обмотках трансформатора.
- 7.5.6. Як визначається ККД трансформатора?
- 7.5.7. Як проводять дослід холостого ходу і які параметри трансформатора можна визначити за даними цього дослідження?
- 7.5.8. Як проводять дослід короткого замикання трансформатора і які параметри трансформатора можна визначити за даними цього дослідження?

Лабораторні роботи

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8. ВИПРОБОВУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

8.1. Мета роботи

Вивчити будову і провести дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Зняти робочі характеристики двигуна.

8.2. Основні теоретичні положення

Для приводу машин і агрегатів переважно використовують асинхронні електродвигуни.

Двигун називається асинхронним тому, що швидкість обертання ротора менша за швидкість обертання магнітного поля статора. Різницю швидкостей характеризують коефіцієнтом, який зветься ковзанням:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%, \quad (8.1)$$

де n_1 – швидкість обертання магнітного поля статора, об/хв.;

n_2 – швидкість обертання ротора двигуна, об/хв.

Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором складається з нерухомої частини – статора і обертової – ротора.

У трифазній обмотці статора, увімкненій у мережу, створюється обертове магнітне поле з швидкістю обертання, що визначається за формулою:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ об/хв.}, \quad (8.2)$$

де f – частота змінного струму, Гц;

p – число пар полюсів.

Швидкість обертання магнітного поля двигуна постійна і не залежить від навантаження:

$$n_1 = \text{const.}$$

Взаємодія обертового магнітного поля статора Φ з індукованим цим полем струмом ротора I_2 створює обертовий момент двигуна

$$M = C\Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (8.3)$$

де C – сталий коефіцієнт, який залежить від конструкції двигуна;

Загальна електротехніка

ψ_2 – кут між струмом I_2 і е.р.с E_2 в роторі;

$I_2 \cos \psi_2$ – активна складова струму ротора.

Знайдений обертовий момент вимірюється в ньютонметрах (Нм) або кілограмометрах (кгм):

$$M = 0,102C\Phi I_2 \cos \psi_2 \text{ (кгм)}. \quad (8.4)$$

На практиці обертовий момент двигуна визначають за формулою:

$$M = 9550 \frac{P_2}{n_2} \text{ (Нм)}, \quad (8.5)$$

де P_2 – потужність на валу двигуна, кВт;

n_2 – швидкість обертання ротора двигуна, об/хв.

В досліді навантаженням асинхронного двигуна є генератор постійного струму, вали яких з'єднані. Змінюючи навантаження генератора, ми змінюємо відповідно і навантаження двигуна. Потужність на застискачах генератора визначається за формулою:

$$P_{\Gamma} = U_2 I_2. \quad (8.6)$$

Оскільки в генераторі є втрати потужності, то потужність на валу двигуна визначається за формулою:

$$P_2 = \frac{P_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = \frac{U_2 I_2}{\eta_{\Gamma}} \text{ (Вт)}, \quad (8.7)$$

де η_{Γ} – ККД генератора постійного струму.

Для генераторів $\eta_{\Gamma} = (0,6 \dots 0,8)$.

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна η дорівнює відношенню корисної потужності на валу P_2 до всієї потужності, що підводиться з мережі до двигуна P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \quad (8.8)$$

При номінальному навантаженні ККД більшості двигунів має значення у межах 0,7-0,95, причому найбільше значення ККД мають двигуни великої потужності. Коефіцієнт потужності двигуна $\cos \varphi_1$ показує, скільки відсотків складає активна потужність від усієї (повної) потужності, що підводиться з мережі до двигуна:

Лабораторні роботи

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (8.9)$$

Робочими характеристиками трифазного асинхронного двигуна є залежності: потужності – P_1 , споживаної двигуном, струму статора – I_1 , коефіцієнту потужності – $\cos \varphi_1$, ККД – η , обертового моменту – M , швидкості обертання ротора – n_2 і ковзання – S від корисної потужності – P_2 на валу двигуна при сталій напрузі – U_1 на затискачах двигуна і при сталій частоті – f_1 (рис. 8.1).

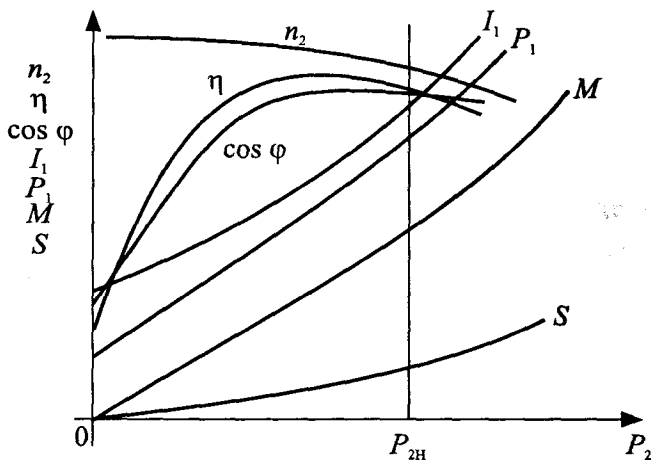


Рис. 8.1

8.3. Порядок виконання роботи

8.3.1. Ознайомитися з обладнанням і приладами, що використовуються в роботі і записати їх технічні характеристики.

8.3.2. За схемою (рис. 8.2) виконати необхідні з'єднання приладів і машин для зняття робочих характеристик трифазного асинхронного двигуна.

8.3.3. Зняти робочі характеристики двигуна, для чого виконати заміри, збільшуючи навантаження генератора постійного струму опором R_n , а відповідно, навантаження асинхронного двигуна. Дані вимірів записати в таблицю 8.1.

По даних таблиці побудувати робочі характеристики асинхронного двигуна.

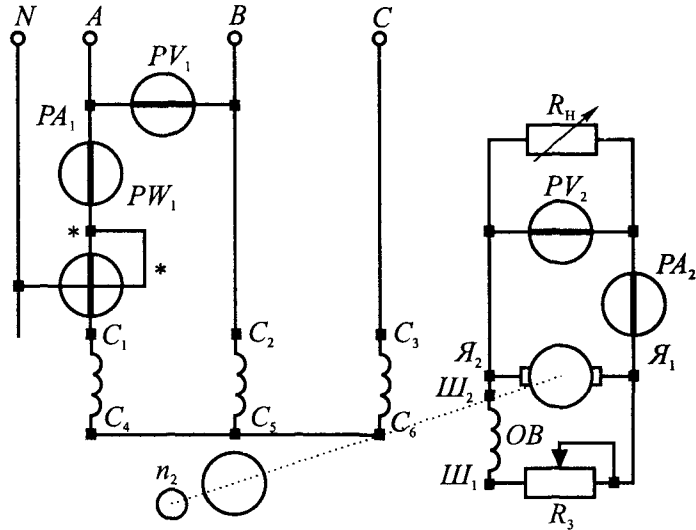


Рис. 8.2

Таблиця 8.1

№	Заміряно						Вирахувано					
	П/П	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$n_2, об/хв$	$M, Нм$	$P_2, Вт$	$\eta, \%$	$\cos\phi$	$S, \%$
1												
2												
3												
4												
5												

8.4. Зміст звіту

- 8.4.1. Мета роботи.
- 8.4.2. Необхідне обладнання.
- 8.4.3. Електрична схема кола, що досліджується.
- 8.4.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.
- 8.4.5. Робочі характеристики асинхронного двигуна.
- 8.4.6. Висновки.

Лабораторні роботи

8.5. Контрольні запитання

- 8.5.1. У чому полягає принцип дії асинхронного двигуна?
- 8.5.2. Що називається синхронною і асинхронною швидкістю і ковзанням двигуна?
- 8.5.3. Як створюється обертове магнітне поле в асинхронному двигуні?
- 8.5.4. Від чого залежить обертовий момент асинхронного двигуна?
- 8.5.5. Як впливає напруга на обертовий момент асинхронного двигуна?
- 8.5.6. Чому пусковий струм асинхронного двигуна більший за номінальний струм?
- 8.5.7. Чому при холостому ході коефіцієнт потужності асинхронного двигуна значно менший, ніж при номінальному навантаженні?
- 8.5.8. Від чого залежить швидкість обертання ротора асинхронного двигуна?
- 8.4.9. Поясніть характер робочих характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

9.1. Мета роботи

Ознайомитися з конструкцією генератора постійного струму і провести дослідження його роботи у різних режимах.

9.2. Основні теоретичні положення

Як відомо, при русі провідника у постійному магнітному полі в ньому виникає індукована електрорушійна сила. На цьому принципі побудовані генератори постійного струму, що складаються: зі статора, який є нерухомою частиною генератора; розташованих на ньому електромагнітів, які породжують магнітне поле, в якому обертається рухома частина – якір. У пазах якоря розташована обмотка, виводи якої приєднані до колектора.

Величина індукованої в ньому ЕРС дорівнює:

$$E = N \frac{P}{60a} \Phi \cdot n, \text{ В} \quad (9.1)$$

де: N – число провідників у обмотці якоря;

P – число пар полюсів;

a – число паралельних віток у обмотці якоря;

Φ – магнітний потік одного полюса, Вб;

n – швидкість обертання, об/хв.

Генератори постійного струму залежно від способу увімкнення обмоток збудження поділяються на дві групи: генератори з незалежним збудженням, які потребують застосування додаткового незалежного джерела постійного струму; генератори з самозбудженням, які бувають із паралельним, послідовним і змішаним збудженням. Найбільш поширене застосування мають генератори з паралельним збудженням.

При дослідженні генератора з паралельним збудженням знімають його основні характеристики: холостого ходу, навантажувальну, зовнішню та регулювальну.

Лабораторні роботи

Характеристика холостого ходу являє собою залежність ЕРС на затискачах генератора від струму збудження $E_0 = f(I_{зб})$ при відсутності навантаження $I = 0$ і сталому числі обертів $n = n_n = \text{const}$.

Крива, що показує зміну напруги на затискачах генератора залежно від зміни струму збудження $n = f(I_{зб})$ при визначеному навантаженні $I = \text{const}$ і сталих обертах $n = n_n = \text{const}$, називається навантажувальною характеристикою генератора.

Зовнішня характеристика генератора показує залежність напруги на затискачах генератора від навантаження $U = f(I)$ при сталих значеннях опору у колі збудження $R_{pz.} = \text{const}$ і швидкості обертання $n = n_n = \text{const}$.

Крива, що вказує, як треба змінювати струм збудження $I_{зб} = f(I)$, щоб забезпечити $U = U_n = \text{const}$ при $n = n_n = \text{const}$, називається регулювальною.

9.3. Програма роботи

Провести дослідження генератора постійного струму з паралельним збудженням, використовуючи відомі методики випробувань, і побудувати за результатами вимірювань його основні характеристики.

9.4. Необхідне обладнання

9.4.1. Двигун постійного струму	– 1 шт.
9.4.2. Генератор постійного струму	– 1 шт.
9.4.3. Тахогенератор	– 1 шт.
9.4.4. Регулювальний реостат	– 1 шт.
9.4.5. Реостат навантаження	– 1 шт.
9.4.6. Амперметр	– 2 шт.
9.4.7. Вольтметр	– 1 шт.

9.5. Порядок виконання роботи

9.5.1. Ознайомитися з будовою генератора постійного струму на стенді.

9.5.2. Згідно зі схемою (рис. 9.1) виконати необхідні з'єднання приладів і обладнання для випробування генератора паралельного збудження.

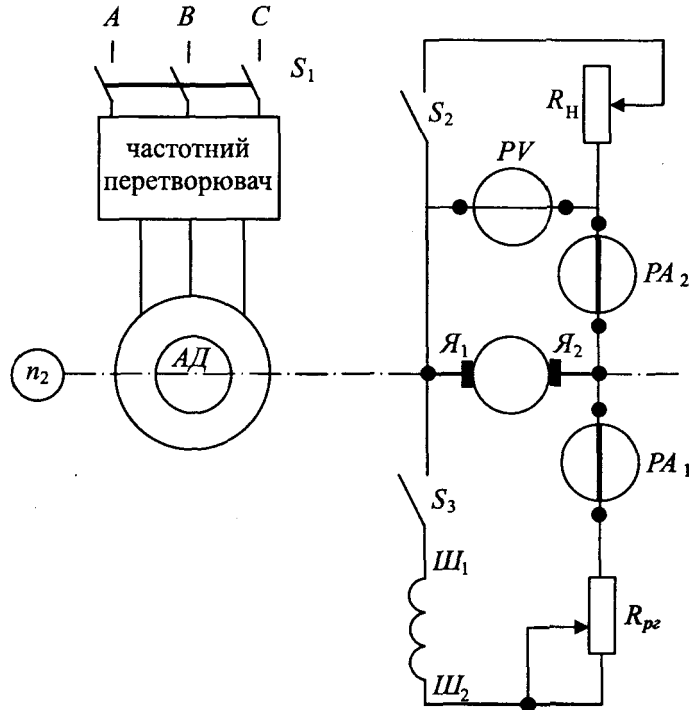


Рис. 9.1

9.5.3. Запустити привідний двигун постійного струму ввімкненням вимикача S_1 і встановити номінальні обороти при холостому ході (вимикачі S_2 і S_3 вимкнуті).

9.5.4. Зняти характеристику холостого ходу, для чого замкнути вимикачем S_3 і встановити регульовальним реостатом R_{pz} такий струм збудження, щоб напруга була більшою за номінальну на 10-15%.

9.5.5. Повільно зменшуючи струм збудження до мінімуму, а потім збільшуючи до попередньої величини, записати 8-10 значень у таблицю 9.1, визначити $U_{xx(сер)} = \frac{U_{xx(уверх)} - U_{xx(униз)}}{2}$ і побудувати характеристику холостого ходу.

Лабораторні роботи

Таблиця 9.1

Виміри	Виміряно		Обчислено
	$I_{зб}, A$	U_{xx}, B	
			при збільшенні $I_{зб}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

9.5.6. Зняти зовнішню характеристику генератора, для чого ввімкнути вимикач S_2 , встановити такий струм збудження, щоб при номінальному струмі навантаження $I = I_n$ напруга дорівнювала номінальній $U = U_n$. Потім, не змінюючи опору R_{pz} , збільшувати струм навантаження від 0 до I_n , при цьому $n = n_n = const$. Дані записати у табл. 9.2 і побудувати зовнішні характеристики.

Таблиця 9.2

Виміри	I, A	U, B	$I_{зб}, A$
1			
2			
3			
4			
5			

9.5.7. Встановити, змінюючи струм збудження, при холостому ході $U = U_n$ і включити навантаження. Змінюючи струм навантаження від $I = 0$ до $I = I_n$, зробити 5-6 вимірів, при цьому весь час підтримувати напругу $U = U_n$ змінюючи струм збудження $I_{зб}$. Дані дослідів занести у табл. 9.3 і побудувати регульовальну характеристику.

Таблиця 9.3

Виміри	I, A	$I_{зб}, A$
1		
2		
3		
4		
5		

9.6. Зміст звіту

9.6.1. Мета роботи.

9.6.2. Необхідне обладнання.

9.6.3. Електрична схема кола, що досліджується.

9.6.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

9.6.5. Графіки зовнішньої та регулювальної характеристик.

9.6.6. Висновки.

9.7. Контрольні запитання

9.7.1. Поясніть принцип дії генератора постійного струму і призначення колектора.

9.7.2. Будова генератора постійного струму, призначення і конструкція окремих частин.

9.7.3. Класифікація машин постійного струму за способом збудження, основні схеми їх включення.

9.7.4. Як одержати характеристику холостого ходу для генератора з паралельним збудженням?

9.7.5. Зовнішня характеристика генератора з паралельним збудженням та спосіб її побудови.

9.7.6. Як одержати регулювальну характеристику генератора з паралельним збудженням?

Лабораторні роботи

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10. ПОВІРКА ВОЛЬТМЕТРА

10.1. Мета роботи

Засвоїти порядок повірки електричних вимірювальних приладів шляхом порівняння їх показів із показами зразкових. Визначити похибки, а також поправки до оцифрованих значень шкал. Визначити відповідність приладів встановленим класам точності, побудувати криві поправок.

10.2. Основні теоретичні положення

При повірці приладів визначаються: абсолютні похибки, поправки до показів, відносні і зведені похибки, а також потужності, що споживаються приладами в номінальному режимі.

Абсолютна похибка вольтметра ΔU визначається як різниця між результатом вимірювання A_x та істинним значенням вимірюваної величини A :

$$\Delta A = A_x - A.$$

Поправка до показу приладу визначається як різниця між істинними значеннями вимірювальних величин U і показом приладу, тобто це абсолютні похибки, взяті з оберненим знаком.

Відносна похибка вимірювання – це відношення абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини, виражене у %:

$$\gamma_{від} = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\%.$$

Зведена похибка приладу – це відношення абсолютної похибки до верхньої межі вимірювань приладу:

$$\gamma_{U_{зв}} = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100\%.$$

Повірка електровимірювальних приладів включає в себе:

- а) зовнішній огляд приладу;
- б) вибір зразкового приладу і підготовка до повірки;
- в) перевірка показників точності приладів;
- д) документальне оформлення результатів повірки.

10.3. Порядок виконання роботи

10.3.1. Зібрати схему, зображену на рис. 10.1.

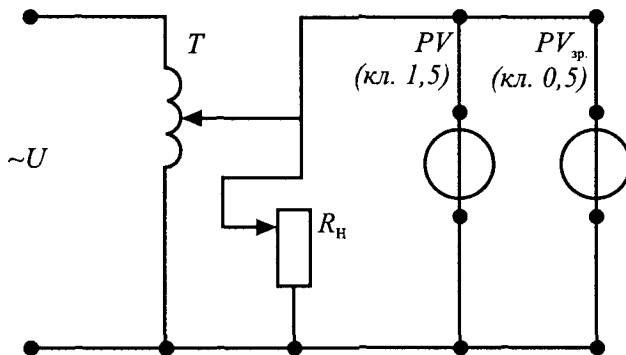


Рис. 10.1. Електрична принципова схема повірки вольтметра

10.3.2. Після повірки та включення схеми, виконати повірку вольтметра PV , вважаючи зразковим вольтметром PV_{zp} . Повірку кожної оцифрованої поділки проводити двічі: перший раз при зростанні напруги від нуля до максимального значення (хід угору) і другий раз при його зменшенні від максимального значення до нуля (хід униз).

10.3.3. Виконати обчислення за формулами:

$$U_{zp.cер.} = \frac{U_{zp.уг.} + U_{zp.ун.}}{2};$$

$$\Delta U = U_{ун.} - U_{zp.cер.}; \quad \sigma = -\Delta U; \quad \gamma_{від.} = \frac{\Delta U}{U_{zp.cер.}} \cdot 100\%;$$

$$\gamma_{зв.} = \frac{\Delta U}{U_{ном.}} \cdot 100\%$$

для вольтметра, що повіряється $U_{зг.} = U_{ун.}$;

$$\delta_{вар} = \frac{U_{zp.уг.} - U_{zp.ун.}}{U_{ном.zp.}} \cdot 100\%.$$

Результати занести до табл. 10.1.

10.3.4. Дати висновок про відповідність вольтметра, що повіряється, своєму класу точності.

Лабораторні роботи

Таблиця 10.1

Покази вольтметрів					Похибки			Варіація $\delta_{\text{вар.}} \%$
Що перевіряється		Зразкового			Абс.	Відн.	Звед.	
Хід угору $U_{\text{уг.}} \text{ В}$	Хід униз $U_{\text{ун.}} \text{ В}$	Хід угору $U_{\text{зр.уг.}} \text{ В}$	Хід униз $U_{\text{зр.ун.}} \text{ В}$	Середнє знач. $U_{\text{зр.сер.}} \text{ В}$	$\Delta U, \text{ В}$	$\gamma_{\text{відн.}} \%$	$\gamma_{\text{зв.}} \%$	
50	50							
100	100							
150	150							
200	200							
250	250							

10.4. Зміст звіту

- 10.4.1. Назва роботи.
- 10.4.2. Мета роботи.
- 10.4.3. Перелік приладів і обладнання.
- 10.4.4. Електричні принципові схеми.
- 10.4.5. Таблиці дослідних даних.
- 10.4.6. Розрахункові формули.
- 10.4.7. Висновок про відповідність приладів, що перевірялися, своєму класу точності.

10.5. Контрольні запитання

- 10.5.1. Назвіть систему вимірювання, що застосовується в електротехніці і перелічіть основні її одиниці.
- 10.5.2. Що називається електровимірювальним приладом?
- 10.5.3. Перелічіть існуючі методи вимірювання.
- 10.5.4. Види похибок. Причини їх виникнення та способи зменшення.
- 10.5.5. Абсолютна та відносна похибки вимірювання. Їх числовий вираз.
- 10.5.6. Зведена основна та додаткова похибки. Їх числовий вираз.
- 10.5.7. Що таке клас точності електровимірювального приладу?
- 10.5.8. Що називається похибками вимірювання та похибками приладу?
- 10.5.9. Що таке чутливість електровимірювального приладу?
- 10.5.10. Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів.
- 10.5.11. Для чого перевіряють електровимірювальні прилади?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11. ПОВІРКА ІНДУКЦІЙНОГО ОДНОФАЗНОГО ЛІЧИЛЬНИКА

11.1. Мета роботи

Вивчити будову однофазного лічильника, набути навиків увімкнення лічильника в мережу і його використання, ознайомитися з методами повірки лічильника.

11.2. Основні теоретичні положення

Використовуються індукційні лічильники в колах змінного струму для обліку електроенергії. Лічильник складається з двох електромагнітів, рухомого алюмінієвого диска, постійного магніту і лічильного механізму.

Принцип дії лічильника полягає в тому, що в електромагнітах утворюються два електромагнітних потоки – Φ_1 і Φ_2 , які пропорційні відповідно напрузі мережі U і робочому струму I . Ці потоки індукують струми в диску. Обертотий момент, що виникає при взаємодії, пропорційний активній потужності:

$$M_0 = kUI \cos \varphi = k_1 P.$$

Гальмівний момент виникає при обертанні диска за рахунок взаємодії сталого магнітного потоку і струмів, що індукуються в диску.

Кількість електроенергії, що витрачається в навантаженні за час t , пропорційна кількості обертів диска:

$$W = Pt = CN,$$

де W – електрична енергія, Вт·с;

P – реактивна потужність, Вт;

C – коефіцієнт пропорційності (стала лічильника);

N – кількість обертів диска лічильника за t секунд.

На лічильнику вказується величина A , зворотна сталій лічильника, яка має назву передатного числа лічильника. Передатне число A дорівнює числу обертів диска, що випадає на одиницю енергії, врахованої лічильником. Наприклад, 1 кВт·година = 1250 об. диска. Розрізняють номінальну C_n та дійсну C_d сталі лічильника.

$$C_n = \frac{1}{A} \left(\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}} \right).$$

Номінальна стала може відрізнятись від дійсної, яка визначається як

$$C_d = \frac{P \cdot t}{N}$$

Тоді відносна похибка лічильника γ може бути знайдена як:

$$\gamma = \frac{W_n - W_d}{W_d} \cdot 100\% = \frac{C_n \cdot N - C_d \cdot N}{C_d \cdot N} \cdot 100\% = \frac{C_n - C_d}{C_d} \cdot 100\%$$

Крім того, визначається поріг чутливості лічильника і відсутність самоходу. Чутливість лічильника – це виражене у відсотках відношення найменшого струму, при якому починає обертатися диск, до номінального струму лічильника:

$$\sigma = \frac{I_{\min}}{I_n} \cdot 100\%$$

Відносна похибка лічильника не повинна перевищувати величини класу точності, яка вказана на шкалі приладу. Поріг чутливості не повинен перевищувати встановленого значення при відсутності самоходу.

11.3. Необхідне обладнання

- | | |
|--|---------|
| 11.3.1. Лічильник однофазний змінного струму | – 1 шт. |
| 11.3.2. Вольтметр | – 1 шт. |
| 11.3.3. Реостат | – 1 шт. |
| 11.3.4. Амперметр | – 1 шт. |

11.4. Порядок виконання роботи

- 11.4.1. Зібрати схему, зображену на рис. 11.1.

Електросекундомір

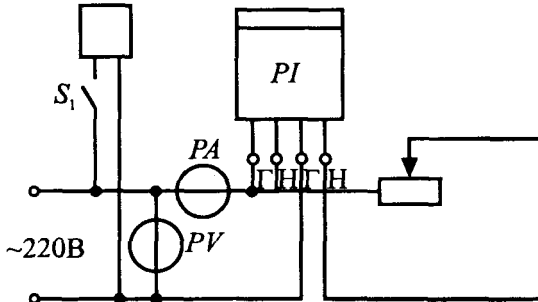


Рис. 11.1

11.4.2. Після перевірки та вмикання схеми виконати перевірку індукційного однофазного лічильника. Час, за який лічильник зробить вказану в таблиці 11.1 кількість обертів N , виміряти за допомогою електросекундоміра. Виміри виконувати шляхом вмикання та вимикання електросекундоміра у мить проходження мітки на рухомому диску лічильника навпроти мітки на нерухомій шкалі. Регулювання струму здійснюється реостатом R_n . При неможливості встановити вказані в таблиці 11.1 значення струму необхідно встановити значення, близькі до вказаних, вписавши в таблицю дійсні значення струму. Дані занести в таблицю 11.1.

Таблиця 11.1

Виміряно				Обчислено							
$U, В$	$I, А$	$N, об$	$t, с$	$P_\delta, Вт$	$W, Вт \cdot с$	$W_\delta, Вт \cdot с$	$C_n, \frac{Вт \cdot с}{об}$	$C_\delta, \frac{Вт \cdot с}{об}$	$\gamma, \%$	$\frac{I}{I_n}, до.$	
220	5	15					3000				
220	4	15					3000				
220	3	15					3000				
220	2	15					3000				
220	1	15					3000				

11.4.3. Виконати обчислення за формулами:

– енергія, зареєстрована лічильником:

$$W = C_n \cdot N = \frac{1000 \cdot 3600}{1200} \cdot N = 3000N;$$

– дійсна потужність $P_\delta = U \cdot I$;

– дійсна енергія $W_\delta = P_\delta \cdot t$;

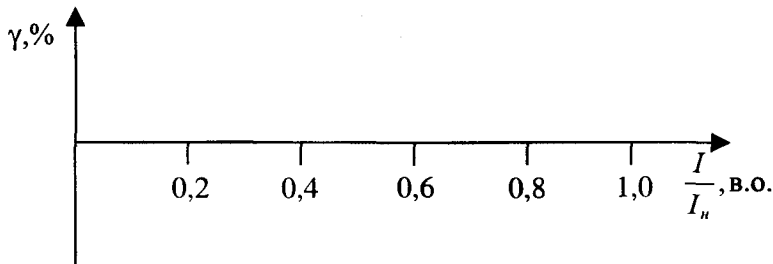
– дійсна стала лічильника $C_\delta = \frac{W_\delta}{N}$;

– номінальна стала лічильника $C_n = 3000 \frac{Вт \cdot с}{об}$;

– відносна похибка лічильника $\gamma = \frac{C - C_\delta}{C_\delta} \cdot 100\%$.

Лабораторні роботи

11.4.4. Побудувати графік залежності $\gamma\left(\frac{I}{I_n}\right)$, при $I_n=5\text{A}$ в такій системі координат:



11.4.5. Дати висновок про відповідність повіреного лічильника своєму класу точності.

11.5. Зміст звіту

11.5.1. Назва роботи.

11.5.2. Мета роботи.

11.5.3. Перелік приладів і обладнання.

11.5.4. Електрична принципова схема однофазного індукційного лічильника.

11.5.5. Таблиця дослідних даних.

11.5.6. Розрахункові формули.

11.5.7. Графік залежності відносної похибки лічильника від відносного навантаження.

11.5.8. Висновки.

11.6. Контрольні запитання

11.6.1. Як класифікувати лічильники електричної енергії?

11.6.2. Чим відрізняються лічильники від інших приладів безпосередньої оцінки?

11.6.3. Що таке стала і передатне число лічильника?

11.6.4. Що таке відносна похибка лічильника і як її визначити?

11.6.5. Що називається чутливістю лічильника?

11.6.6. Вказати призначення гальмівного прапорця, гальмівного гачка та компенсатора тертя індукційного лічильника?

11.6.7. Що таке самохід? Які причини його виникнення?

11.6.8. Які особливості перевірки лічильників електричної енергії?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

12.1. Мета роботи

Провести дослідження однопівперіодної та двопівперіодної схем випрямлячів, схеми фільтрів, а також методи розрахунків випрямлячів у колах однофазного струму.

12.2. Основні теоретичні положення

Основними елементами випрямлячів змінного струму є: трансформатор, електричний вентиль, фільтр та споживач. Трансформатор використовується для перетворення напруги мережі до необхідної величини, а також для розділення кіл постійного і змінного струмів.

Електричний вентиль здійснює перетворення змінної напруги в пульсуючу, де частота пульсації залежить від використання схеми, за якою побудовано випрямляч. Фільтри призначені для згладжування пульсуючого струму, тобто зменшення змінної і підвищення постійної складових.

У колах однофазного струму застосовують такі схеми побудови випрямлячів: однопівперіодна, двопівперіодна з виводом від середньої точки трансформатора, мостова.

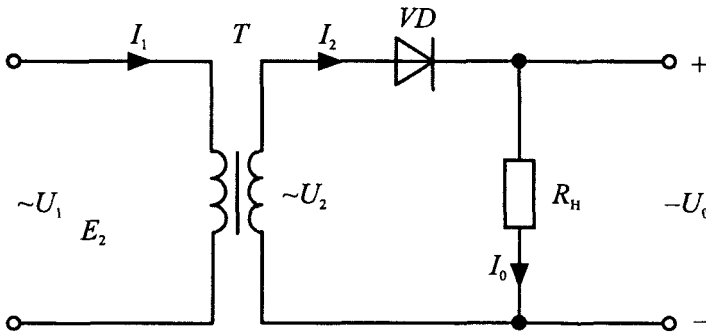


Рис. 12.1

На рис. 12.1 показана принципова схема однопівперіодного випрямляча з активним навантаженням, а на рис. 12.2 – криві напруги, що подається, випрямленого струму, а також його складових.

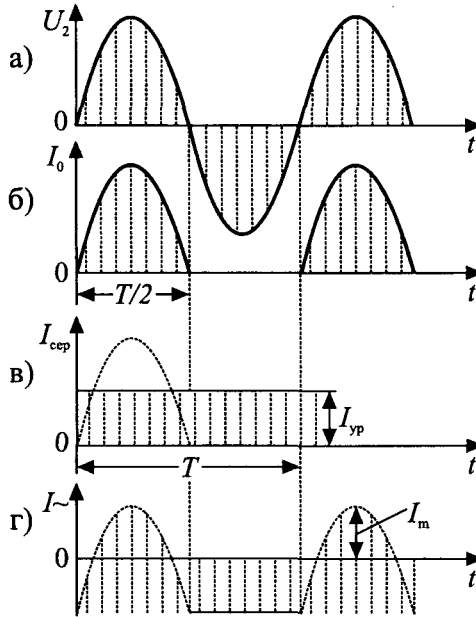


Рис. 12.2

Однопівперіодна схема характеризується тим, що через споживача струм буде проходити тільки протягом однієї половини періоду, тоді як на аноді вентиля потенціал буде позитивним, а на катоді негативним. При зміні знака потенціалу на протилежний струм через вентиль не пройде, бо він має дуже великий зворотний опір. Граничний електричний режим діодів характеризують такі параметри:

$U_{зв.макс}$ – максимальна зворотна напруга;

$I_{зв.макс}$ – максимальний прямий струм.

Необхідно враховувати також максимальну частоту діодів. У випадках підвищення цієї частоти діоди втрачають вентильні властивості. Для надійної роботи діодів у випрямлячах потрібне виконання умов $I_{пр.сеп} > I_{н.сеп}$ і $U_{зв.макс} > \sqrt{2}U_{2.макс}$. При випрямленні напруги, амплітудне значення якої перевищує $U_{зв.макс}$ діода, вмикають послідовно декілька однотипних діодів. Пульсуючий випрямлений струм I_0 створює на споживачу спад напруги U_0 , яка називається випрямленою напругою. Для оцінки ефекту випрямлення пульсуючий струм розкладають на його складові: постійну $I_{сеп}$ і змінну I_{m-} . Для однопівперіодної схеми

випрямлення постійна складова струму буде дорівнювати

$$I_{cep} = 0,45I_2, \quad (12.1)$$

де I_2 – діюче (ефективне) значення синусоїдного струму вторинної обмотки трансформатора, яке дорівнює $\frac{I_{m2}}{\sqrt{2}}$.

Що стосується змінної складової випрямленого струму I_{m-} (рис. 12.2), то її можна визначити, якщо скористатися значенням коефіцієнта пульсації:

$$K_{\Pi} = \frac{I_{m-}}{I_{cep}}, \quad (12.2)$$

звідки $I_{m-} = K_{\Pi} I_{cep}$, де під коефіцієнтом пульсації розуміють величину, яка дорівнює відношенню амплітуди змінної складової випрямленого струму до його постійної складової.

Так як для однопівперіодної схеми $K_{\Pi} = 1,57$, то

$$I_{m-} = 1,57I_{cep} \approx 0,7I_2. \quad (12.3)$$

Аналогічно записуються вирази для визначення постійної U_{cep} і U_{m-} змінної складових випрямленої напруги U_0 :

$$U_{cep} = 0,45U_2; \quad (12.4)$$

$$U_{m-} \approx 0,7U_2, \quad (12.5)$$

де U_2 – діюче значення напруги на вторинній обмотці трансформатора.

Нарешті, щоб повністю охарактеризувати властивості однопівперіодної схеми випрямлення, потрібно визначити максимальне значення зворотної напруги. Як видно зі схеми, вона буде дорівнювати амплітудному значенню напруги на вторинній обмотці трансформатора:

$$U_{зв. макс} = 1,41U_2. \quad (12.6)$$

До позитивних якостей однопівперіодної схеми слід віднести її простоту та можливість використання тільки одного вентиля. Проте істотні недоліки (велика пульсація, невелике значення постійної

складової, вимушене намагнічування осердя трансформатора постійною складовою, велика зворотня напруга та ін.) призвели до того, що в наш час схема використовується рідко.

Широко використовується на практиці двопівперіодна схема випрямлення однофазного струму з виводом від середньої точки трансформатора (рис. 12.3).

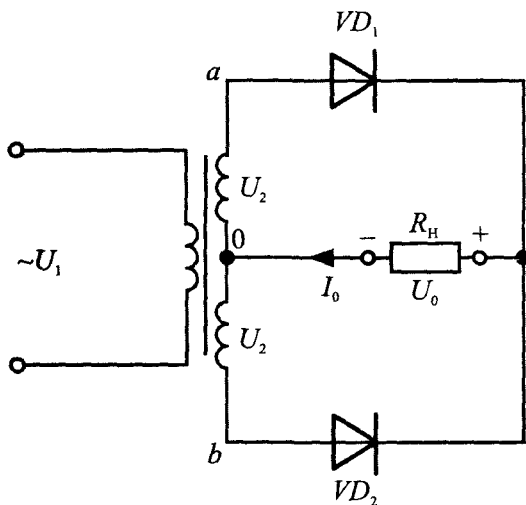


Рис. 12.3

Для схеми характерно те, що випрямлений струм I_0 проходить через опір навантаження R_n протягом повного періоду. Дійсно, якщо потенціал верхньої точки "а" вторинної обмотки трансформатора буде вищим за потенціал його нижньої точки "b", то буде працювати вентиль VD_1 , так як струм пройде від точки "а" через вентиль VD_1 і R_n до середньої точки 0. При цьому через вентиль VD_2 струм пройти не може, так як він буде мати великий зворотний опір. При зміні знаку прикладеної напруги на протилежний, тобто, якщо потенціал нижньої точки "b" буде вище потенціалу верхньої точки "а" працювати буде вентиль VD_2 . В цьому випадку струм замкнеться в колі так: точка "b", вентиль, споживач, точка 0. Таким чином, через резистор навантаження R_n випрямлений струм пройде як в момент одного, так і в момент другого півперіоду прикладеної напруги, тому схема називається двопівперіодною.

На рис. 12.4 приведені криві напруги, що подається на вентиль і отриманого випрямленого струму з його складовими: постійною I_{cep} і змінною I_m . Щоб визначити величину постійної складової випрямленого струму I_{cep} для даної схеми, достатньо нагадати, що її величина буде в 2 рази більша за постійну складову для однопівперіодної схеми, так як в двопівперіодній схемі за період одержуємо дві півхвилі, а в однопівперіодній схемі – одну. Таким чином,

$$I_{cep} = 2 \cdot 0,45 I_2 = 0,9 I_2, \quad (12.7)$$

$$U_{cep} = 0,9 U_2. \quad (12.8)$$

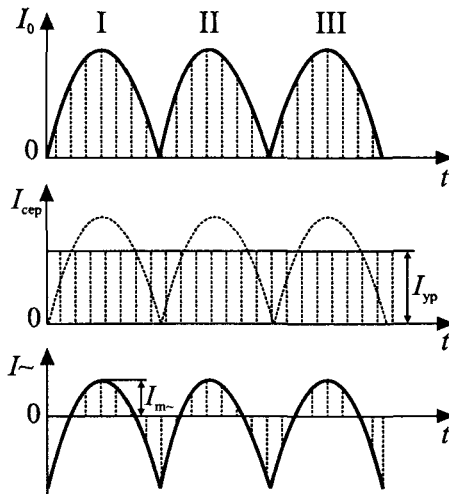


Рис. 12.4

Для визначення коефіцієнта пульсації можна використати відому із теорії формулу, застосовану для $m \neq 1$:

$$K_n = \frac{2}{m^2 - 1}, \quad (12.9)$$

де m – число пульсації за період.

Тоді отримаємо:

$$K_n = \frac{2}{2^2 - 1} \approx 0,667 = 66,7\%. \quad (12.10)$$

Лабораторні роботи

Значення $I_{cep.}$ і K_n нам відомі, тепер легко визначити змінну складову

$$I_{m\sim} = K_n I_{cep} = 0,667 \cdot 0,9 I_2, \quad (12.11)$$

$$U_{m\sim} = 0,6 U_2. \quad (12.12)$$

Якщо нехтувати внутрішнім опором вентиля прямому струмові, то величина максимальної зворотної напруги, прикладеної до будь якого із вентилів, буде дорівнювати подвоєному значенню напруги на вторинній обмотці трансформатора, отже

$$U_{зв. м} = 2U_{m2} = 2,82U_2. \quad (12.13)$$

Порівняно з однопівперіодною дана схема має істотні переваги, до яких слід віднести:

1) менша величина пульсацій, більше значення постійної складової, що дозволяє використовувати більш прості фільтри;

2) відсутність примусового підмагнічування осердя трансформатора, викликана компенсацією протилежно направлених магнітних потоків, які утворені рівними і протилежно направленими випрямленими струмами, які протікають по рівним половинам вторинної обмотки трансформатора;

3) краще використання трансформатора, тому що вторинна обмотка працює обидва півперіоди, що значно підвищує коефіцієнт використання первинної обмотки, отже, і всього трансформатора.

Наявність у схемі двох вентилів і трансформатора з виводом від середньої точки дещо ускладнює схему порівняно з однопівперіодною, але згідно з вищезгаданими перевагами вона отримала дуже широке застосування на практиці, особливо в радіотехніці і електроніці.

Широке застосування одержала й інша двопівперіодна схема у колі однофазного струму – однофазна мостова схема випрямлення. У цій схемі застосовуються чотири вентиля, котрі вмикаються по принципу вимірювального моста. До однієї діагоналі такого моста подається змінна напруга від трансформатора, а до другої приєднується споживач (рис. 12.5).

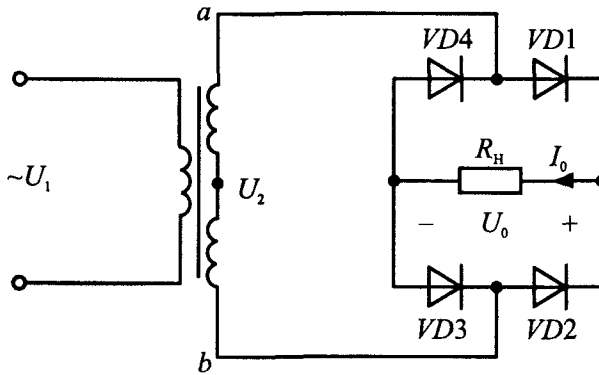


Рис. 12.5

Принцип роботи мостової схеми такий. При позитивному потенціалі в точці "а" струм піде через вентиль $VD1$, резистор споживача, вентиль $VD3$ до точки "б". При зміні знака потенціалу на протилежний струму буде проходити від точки "б" через вентиль $VD2$, споживач (у тому ж напрямку), вентиль $VD4$ до точки "а".

Отже у кожний півперіод через споживача буде проходити випрямлений струм, який створює випрямлену напругу. Все, що було сказано про фізичні явища, які відбуваються при випрямленні в двопівперіодній схемі з виводом від середньої точки трансформатора, залишається вірним і для мостової схеми. Проте ця схема має і свої електричні властивості. До переваг мостової схеми у порівнянні з двопівперіодною схемою з нульовою точкою слід віднести:

- 1) удвічі менша напруга на вторинній обмотці трансформатора;
- 2) значно менша зворотна напруга, яка припадає на вентиль, так як завжди працюють два послідовно увімкннутих вентиля;
- 3) краще використовувати трансформатор, оскільки уся вторинна обмотка працює протягом кожної половини періоду;
- 4) відпадає необхідність виводу від середньої точки трансформатора;
- 5) можливість використання схеми без трансформатора, якщо число набраних вентилів розраховано на напругу мережі.

12.3. Програма роботи

Виконати дослідження на натурній моделі однопівперіодного і двопівперіодного випрямлячів і фільтрів.

12.4. Необхідне обладнання

12.4.1. Трансформатор	– 1 шт.
12.4.2. Діоди	– 4 шт.
12.4.3. Котушка індуктивності	– 1 шт.
12.4.4. Амперметр	– 2 шт.
12.4.5. Вольтметр	– 2 шт.
12.4.6. Конденсатор	– 2 шт.
12.4.7. Реостат	– 1 шт.
12.4.8. Вимикач	– 5 шт.

12.5. Порядок виконання роботи

12.5.1. Зібрати схему згідно рис. 12.6.

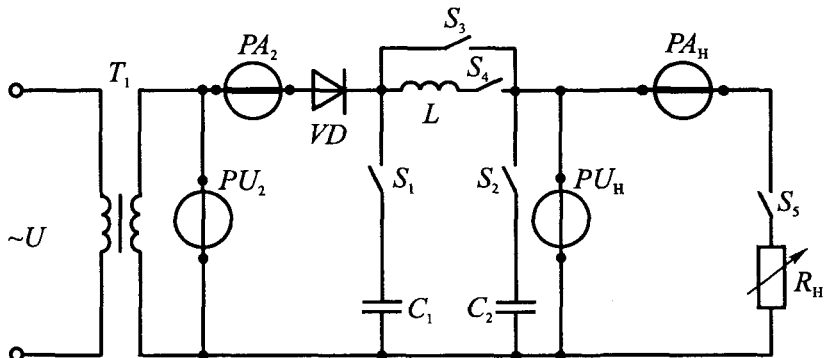


Рис. 12.6

12.5.2. Зняти зовнішню характеристику випрямляча $U = f(I)$ без фільтра, для чого за допомогою змінного резистора навантаження змінюють величину випрямленого струму від нуля до номінального значення. Дані вимірів занести в таблицю 12.1.

12.5.3. Зняти зовнішню характеристику випрямляча з Г-подібним і П-подібним фільтрами.

12.5.4. За допомогою осцилографа зняти осцилограми миттєвих значень на вторинній обмотці трансформатора і навантаженні. Осцилограми миттєвих значень напруг зарисувати.

12.5.5. Зняти осцилограми миттєвих значень напруги з Г-подібним та П-подібним фільтрами. Осцилограми зарисувати.

12.5.6. Визначити коефіцієнт пульсації K_n випрямленої напруги на навантаженні без фільтрів і з фільтрами (Г-подібним та П-подібним).

Для цього необхідно виміряти амплітуду основної гармоніки на-
 пруги на навантаженні $U_{m.осн.}$ і середнє значення випрямленої напруги
 на навантаженні $U_{н.сеп.}$, яке визначається по вольтметру на стенді. $U_{m.осн.}$
 визначають з осцилограми напруг на навантаженні, знятому без фільтра
 і з фільтром:

$$U_{m.осн.} = Nm_U [В],$$

де N – кількість поділок, які відповідають амплітуді осцилограми;
 m_U – масштаб напруг осцилограми (вольт/поділка).

Дані вимірів і розрахунків занести в таблицю 12.2.

12.5.7. Визначити частоту пульсації випрямленої напруги на наван-
 таженні без фільтра:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{nm_c},$$

де T – період осцилограми; n – кількість поділок відносно періоду
 осцилограми; m_c – масштаб часу осцилограми (час/поділок).

12.5.8. За даними п. 12.5.3 побудувати зовнішні характеристики
 випрямляча в одній системі координат.

Таблиця 12.1

№ п/п	Без фільтра		Г-подібний фільтр		П-подібний фільтр	
	$U_{н.сеп.}, В$	$I_{н.сеп.}, А$	$U_{н.сеп.}, В$	$I_{н.сеп.}, А$	$U_{н.сеп.}, В$	$I_{н.сеп.}, А$
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Таблиця 12.2

Режим випрямлення	$U_{m.осн.}, В$	$U_{н.сеп.}, В$	K_n
Без фільтра			
Г-подібний фільтр			
П-подібний фільтр			

12.6. Зміст звіту

12.6.1. Мета роботи.

12.6.2. Необхідне обладнання.

12.6.3. Електрична схема кола, що досліджується.

12.6.4. Таблиці з дослідженнями і розрахунками.

12.6.5. Графіки зовнішніх характеристик фільтрів і рисунки осцилограм.

12.6.6. Висновки.

12.7. Контрольні запитання

12.7.1. Перерахувати основні параметри діодів і пояснити вольт-амперну характеристику діодів.

12.7.2. Нарисуйте блок-схему випрямляча і поясніть призначення основних вузлів.

12.7.3. Поясніть принцип дії однопівперіодного випрямляча, двопівперіодного випрямляча і мостової схеми випрямляча.

12.7.4. Властивості і порівняльні характеристики схем випрямлення (однопівперіодної, двопівперіодної і мостової).

12.7.5. Який вигляд має зовнішня характеристика випрямляча і залежність ККД випрямляча від навантаження?

12.7.6. Поясніть, що таке коефіцієнт пульсації і як він визначається для 3-х основних схем випрямлення?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13. ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА НА ТРАНЗИСТОРІ

13.1. Мета роботи

Дослідження параметрів підсилювача на біполярному транзисторі за загальним емітером.

13.2. Основні теоретичні положення

Підсилювач – це пристрій, призначений для підсилення потужності вхідного сигналу за рахунок споживання енергії джерела живлення.

Залежно від схеми вмикання біполярного транзистора підсилювачі підрозділяються на підсилювачі із загальним емітером, загальною базою і загальним колектором.

Схема підсилювача із загальним емітером наведена на рис. 13.1.

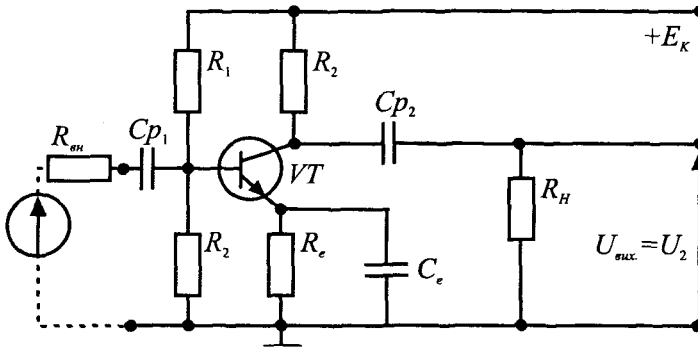


Рис. 13.1

До основних параметрів підсилювачів належать: коефіцієнти підси-

лення по напрузі $K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$, струму $K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}$, потужності $K_p = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}$,

вхідний опір $R_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$, вихідний опір $R_{вих} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta I_{вих}}$, коефіцієнт ко-

рисної дії $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, де P_1 – потужність, що споживається підсилювачем із навантаженням, P_2 – потужність, що надходить у навантаження.

Лабораторні роботи

Так як схема підсилювача містить у собі реактивні елементи, а якості транзистора залежать від частоти, то коефіцієнт підсилення має різні значення на різних частотах. Це явище називається частотними викривленнями підсилювача. Для їх оцінки введено параметр, який називається коефіцієнтом частотних викривлень і дорівнює відношенню коефіцієнта підсилення на даній частоті $K_{U(\omega)}$ до коефіцієнта підсилення на середніх частотах K_{U_0} , тобто $M(\omega) = \frac{K_{U(\omega)}}{K_{U_0}}$. Частоти, на яких коефіцієнт підсилення досягає гранично допустимого значення

$K_{U(\omega)_{сп}} = \frac{K_{U_0}}{\sqrt{2}U_2} = 0,707K_{U_0}$, називаються верхньою $\omega_{всп}$ і нижньою $\omega_{нсп}$ граничними частотами, а їх різниця $\Delta\omega = \omega_{всп} - \omega_{нсп}$ – смугою пропускання підсилювача (рис. 13.2).

$K_{U(\omega)_{сп}} = \frac{K_{U_0}}{\sqrt{2}U_2} = 0,707K_{U_0}$, називаються верхньою $\omega_{всп}$ і нижньою $\omega_{нсп}$ граничними частотами, а їх різниця $\Delta\omega = \omega_{всп} - \omega_{нсп}$ – смугою пропускання підсилювача (рис. 13.2).

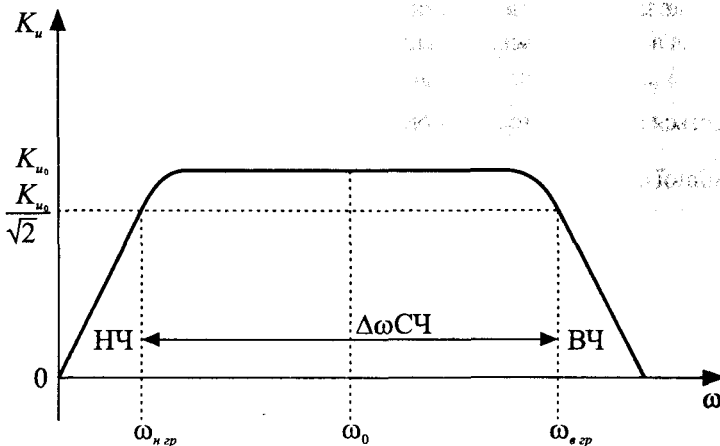


Рис. 13.2

Однією з основних характеристик підсилювача є його амплітудна характеристика – це залежність амплітуди вихідного сигналу $U_{вихт}$ до амплітуди вхідного сигналу $U_{вхт}$ на деякій постійній частоті (рис. 13.3).

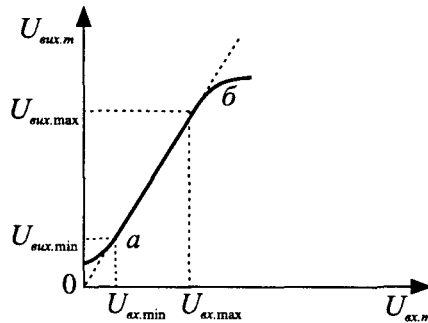


Рис. 13.3

Амплітудна характеристика ідеального підсилювача є пряма лінія, що проходить через початок координат, а амплітудна характеристика реального підсилювача збігається з характеристикою ідеального підсилювача тільки на ділянці *аб*. При більших вхідних сигналах $U_{вх.m} > U_{вх.m \max}$, вихідна напруга підсилювача перестає зростати; це пов'язане з тим, що робоча точка транзистора опиняється в ділянці насичення або відтинання (це виникає за рахунок нелінійних якостей транзистора). При цьому вихідний сигнал викривляється. Це явище називається нелінійним викривленням

і оцінюється коефіцієнтом гармонік $K_2 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{P_n}{P}}$, де P_n – потужність n -ої гармонійної складової вихідного сигналу, P_1 – потужність 1-ої гармоніки.

Для того, щоб визначити коефіцієнти підсилення по напрузі, струму і потужності, треба, крім вхідної і вихідної напруги, визначити вхідний і вихідний опори.

Для визначення вхідного опору використовують схему (рис. 13.4).

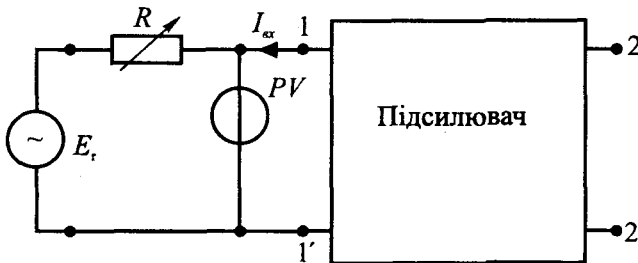


Рис. 13.4

Лабораторні роботи

У цій схемі: E_2 – напруга на виході звукового генератора; R – проградуйований змінний опір.

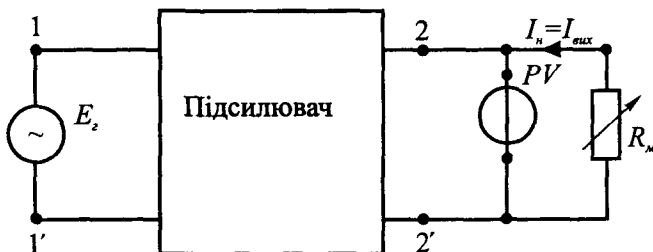


Рис. 13.5.

де R_m – змінний проградуйований опір.

Підсилювач із сторони вихідних затискачів являє собою активний двополіусник з ЕРС $U_{\text{вих.х.х.}}$ і вихідним опором $R_{\text{вих.}}$, який треба виміряти.

13.3. Програма роботи

13.3.1. Визначити вхідний опір підсилювача.

13.3.2. Визначити вихідний опір підсилювача.

13.3.3. Визначити коефіцієнти підсилення напруги K_U , струму K_I , потужності K_P .

13.4. Необхідне обладнання

- | | |
|----------------------------|---------------|
| 13.4.1. Лабораторний стенд | – 1 шт. |
| 13.4.2. Вольтметр | – 2 шт. |
| 13.4.3. Осцилограф | – 1 шт. |
| 13.4.4. Магазин опорів | – 1 шт. |
| 13.4.5. З'єднуючі проводи | – 1 комплект. |

13.5. Порядок виконання роботи

13.5.1. Виміряти вхідний опір підсилювача, використовуючи схему з'єднань (рис. 13.4). При цьому встановити значення опору $R=0$ і вольтметром визначити значення вхідної напруги $u_{\text{вх}} = E_2$ потім змінити опір резисторів так, щоб вольтметр показував $u_{\text{вх}} = \frac{E_2}{2}$; значення цього опору і є вхідним опором підсилювача $R = R_{\text{вх.}}$.

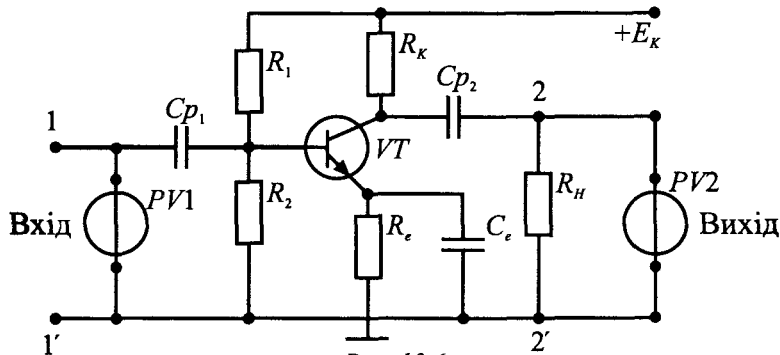


Рис. 13.6

13.5.2. Виміряти вихідний опір підсилювача, використовуючи схему з'єднань (рис. 13.6), при цьому встановлюють R_M так, щоб його опір дорівнював нескінченності ($R_M = \infty$), і вольтметром визначають вихідну напругу $u_{\text{вих}} = U_{\text{вих.х.х.}}$, потім змінюємо значення R_M доти, доки вольтметр не покаже $u_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих.х.х.}}}{2}$, одержимо значення опору R_M , яке і є вихідним опором підсилювача.

13.5.3. Виміряти значення напруг на вході і виході підсилювача при $f_{\text{зе}} = 1$ кГц, $R_n = R_{\text{вих}}$. Визначити коефіцієнти K_U , K_I , K_p за формулами:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}; \quad K_I = K_U \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вих}}} = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}};$$

$$K_p = K_U \cdot K_I = K_U^2 \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вих}}} = K_I^2 \frac{R_{\text{вих}}}{R_{\text{вх}}}.$$

13.6. Зміст звіту

13.6.1. Мета роботи.

13.6.2. Необхідне обладнання.

13.6.3. Електрична схема досліджуваного кола.

13.6.4. Розрахункові дані характеристик підсилювача.

13.6.5. Висновки.

13.7. Контрольні запитання

13.7.1. В якому підсилювачі відбувається підсилення за струмом та потужністю?

13.7.2. Визначити за принциповою схемою підсилювача спосіб увімкнення транзистора.

2. ПРИКЛАДИ ТА ЗАДАЧІ

2.1. ПЕРЕДМОВА

Наведені приклади і задачі розбиті за окремими розділами, що відповідають розділам теоретичної частини підручника. Найбільшу увагу приділено методам розрахунку електричних кіл. Задачі можуть бути використані як складова частина лабораторних робіт. Для більш поширеного вивчення методів розрахунку електричних і магнітних кіл, визначення характеристик електричних машин і трансформаторів, а також параметрів випрямлячів і підсилювачів, може бути використана література [11, 26, 28, 33-37, 40]. У деяких розділах використані окремі задачі з цих навчальних посібників.

2.2. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Задача 2.2.1. Використовуючи закон Ома, знайти струм у колі (рис. 2.2.1), яке містить джерело ЕРС, величина якого дорівнює 80 В, і два опори, з'єднані послідовно, величини яких дорівнюють відповідно $R_1=5$ Ом, $R_2=15$ Ом.

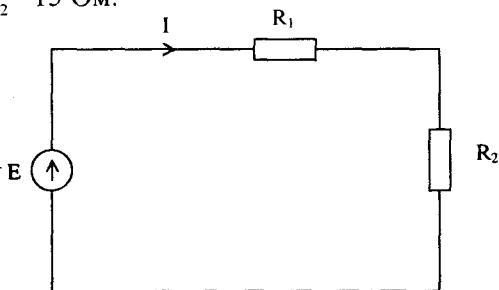
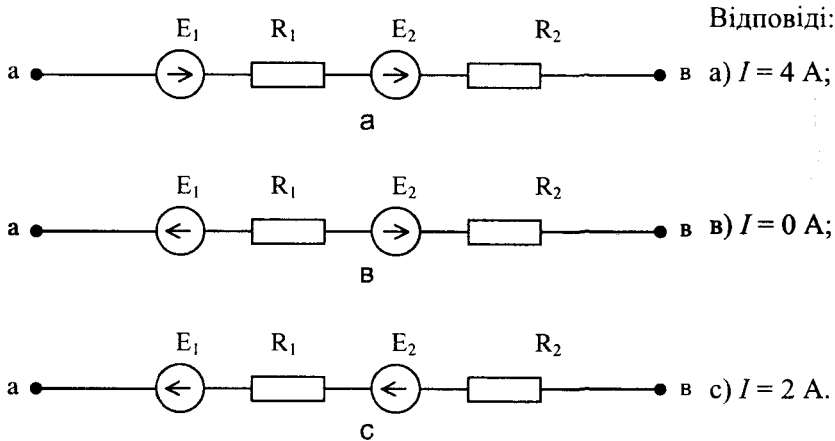


Рис. 2.2.1

Відповідь: $I = 4$ А.

Задача 2.2.2. До затискачів кола "а-в" прикладена напруга $U_{ав}$, що дорівнює 40 В, крім того у колі розташовані дві ЕРС, $E_1=80$ В, $E_2=40$ В і опори $R_1=10$ Ом, $R_2=30$ Ом. Визначити струми у вітках при різних сполученнях напрямів дії ЕРС (рис. 2.2.2, а, в, с).



Відповіді:

a) $I = 4 \text{ A}$;

b) $I = 0 \text{ A}$;

c) $I = 2 \text{ A}$.

Рис. 2.2.2

Задача 2.2.3. Для кола зображеного на рис. 2.2.3. визначити еквівалентний опір $R_{екв}$ відносно затискачів "а-в", якщо опори кола мають такі величини: $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 6 \text{ Ом}$, $R_4 = 2 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$, $R_6 = 4 \text{ Ом}$, $R_7 = 9 \text{ Ом}$.

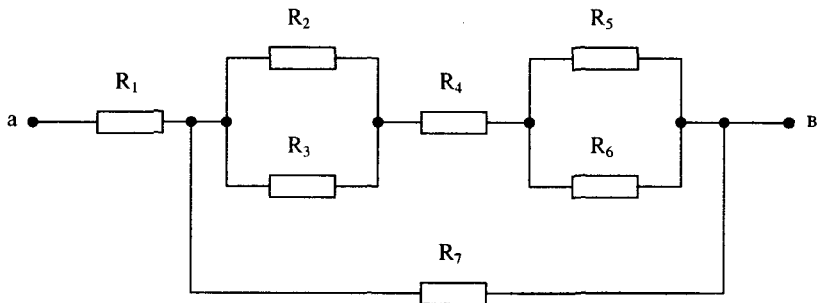


Рис. 2.2.3

Відповідь: $R_{екв} = 7,6 \text{ Ом}$.

Задача 2.2.4. Визначити струми у вітках і напруги на ділянках кола $U_{ав}$, $U_{вс}$, U_{cd} ; зображеного на рис. 2.2.4, якщо опори мають величини: $R_1 = 12 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 24 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$, $R_5 = 14 \text{ Ом}$, $R_6 = 6 \text{ Ом}$, а напруга, прикладена до затискачів U_{ad} , дорівнює 80 В .

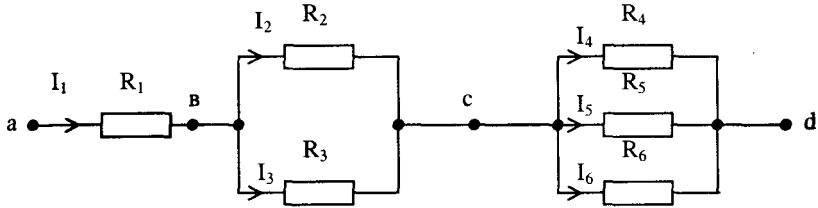


Рис. 2.2.4

Відповідь: $U_{ab}=32,95$ В, $U_{bc}=36,61$ В, $U_{cd}=10,44$ В;
 $I_1=2,7458$ А, $I_2=1,2203$ А, $I_3=1,5254$ А;
 $I_4=0,2609$ А, $I_5=0,7453$ А, $I_6=1,7398$ А.

Задача 2.2.5. Визначити еквівалентний опір кола (рис. 2.2.5.) відносно затискачів “а – в”, якщо опори елементів кола мають такі величини: $R_1=2$ Ом, $R_2=5$ Ом, $R_3=4$ Ом, $R_4=6$ Ом, $R_5=10$ Ом, $R_6=10$ Ом.

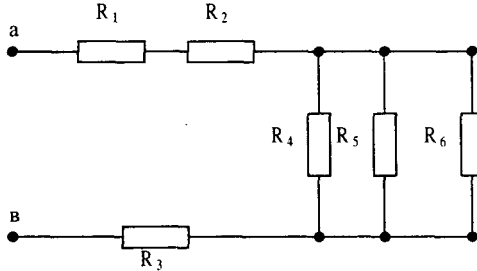


Рис. 2.2.5

Відповідь: 13,73 Ом.

Задача 2.2.6. Напряга, прикладена до затискачів кола (рис. 2.2.6), дорівнює $U_{ab}=220$ В. Знайти розподіл струмів у вітках кола, якщо опори мають такі величини: $R_1=1$ Ом, $R_2=8$ Ом, $R_3=10$ Ом, $R_4=2$ Ом, $R_5=10$ Ом, $R_6=3$ Ом.

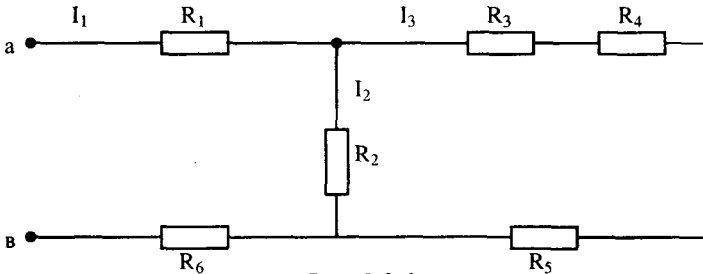


Рис. 2.2.6

Відповідь: $I_1=22,3$ А, $I_2=16,35$ А, $I_3=5,95$ А.

Задача 2.2.7. Коло, зображене на рис. 2.2.7, складене з опорів, величини яких дорівнюють: $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$, $R_6 = 4 \text{ Ом}$. У вітці "a - в" тече струм $I_1 = 5 \text{ А}$, а у вітці "c - f" $I_2 = 8 \text{ А}$. Визначити різницю потенціалів між токами "a - f", "f - e", "e - a".

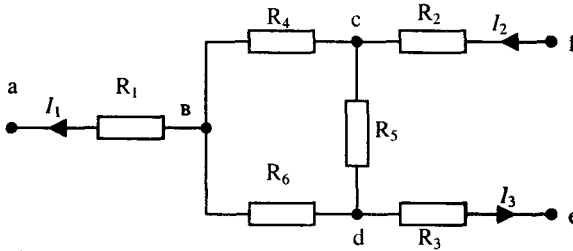


Рис. 2.2.7

Відповідь: $U_{a-f} = 66,3 \text{ В}$,
 $U_{f-e} = 21,66 \text{ В}$,
 $U_{e-a} = 44,64 \text{ В}$.

Задача 2.2.8. Коло (рис. 2.2.8), складене з опорів, величини яких дорівнюють: $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 3 \text{ Ом}$, $R_5 = 3 \text{ Ом}$, $R_6 = 6 \text{ Ом}$. До точок a, c підключене джерело ЕРС, величина якого дорівнює 20 В. Визначити струми, що течуть через опори.

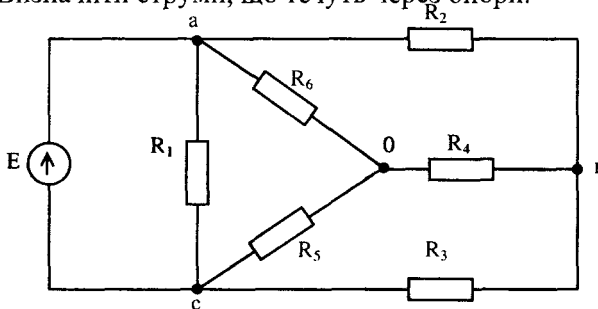


Рис. 2.2.8

Відповідь: $I_1 = 10 \text{ А}$,
 $I_2 = 7,435 \text{ А}$,
 $I_3 = 6,261 \text{ А}$,
 $I_4 = 1,174 \text{ А}$,
 $I_5 = 3,001 \text{ А}$,
 $I_6 = 1,827 \text{ А}$.

Приклади та задачі

Задача 2.2.9. Електричне коло (рис. 2.2.9) має три вітки і два вузли. Величини елементів, що складають коло, дорівнюють: $E_1 = 10$ В, $E_2 = 7$ В, $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 100$ Ом. Визначити струми у вітках методами рівнянь Кірхгофа, контурних струмів, накладання і вузлових потенціалів.

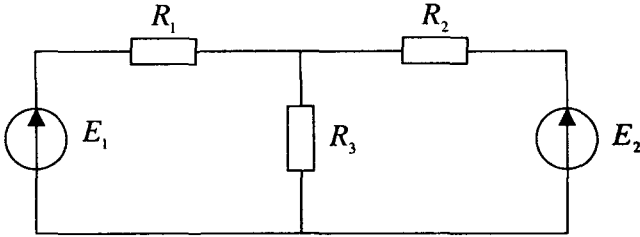


Рис. 2.2.9

2.2.9.1. Метод рівнянь Кірхгофа.

Розв'язання:

1. Визначимо струми методом рівнянь Кірхгофа, для чого довільно виберемо напрями струмів у вітках (рис. 2.2.9.1)

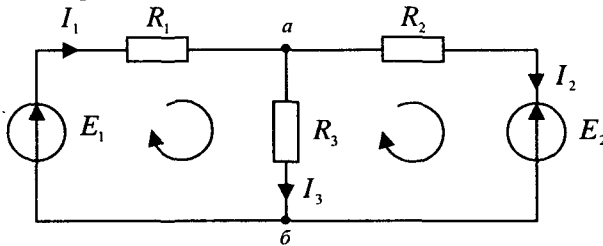


Рис. 2.2.9.1

Так як невідомих три (I_1, I_2, I_3), то треба скласти три рівняння. Перше рівняння складаємо за першим законом Кірхгофа для вузла „а”.

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

Взагалі кількість рівнянь, що складаються за першим законом Кірхгофа, дорівнює кількості вузлів без одиниці:

$$N_{\text{рівн.}} = N_{\text{вуз}} - 1.$$

За другим законом Кірхгофа, кількість рівнянь дорівнює кількості незалежних контурів, або

$$N_{\text{рівн.}} = N_{\text{віток}} - N_{\text{вуз}} + 1.$$

Тобто від кількості віток віднімають кількість рівнянь, що складені за першим законом Кірхгофа.

Для того, щоб скласти рівняння за другим законом Кірхгофа, треба довільно вибрати напрями обходу контурів. Вибираємо одностайні напрями у кожному з контурів за годинниковою стрілкою.

Рівняння, складені за другим законом Кірхгофа, матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_3 R_3 &= E_1, \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 &= -E_2. \end{aligned}$$

Знак “плюс” перед добутком $I \cdot R$ ставиться тоді, коли напрям обходу і напрями струму у вітці збігаються, а мінус – коли вони мають протилежні напрями. Це правило стосується і знаків при ЕРС, тобто якщо напрям дії ЕРС збігається з напрямом обходу контуру, то ЕРС у правій частині рівнянь має знак “плюс”, якщо вони мають протилежні напрями, – то “мінус”.

Таким чином, маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2 \end{cases} .$$

Підставляємо значення параметрів елементів і розв’язуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 50 + I_3 100 = 10 \\ I_2 100 - I_3 100 = -7 \end{cases} .$$

Підставляємо у друге рівняння вираз для струму I_1 , який одержуємо з першого рівняння:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + I_3, \\ (I_2 + I_3) 50 + I_3 100 &= 10, \\ I_2 100 - I_3 100 &= -7. \end{aligned}$$

Отримуємо систему з двох рівнянь:

$$\begin{aligned} I_2 50 + I_3 150 &= 10, \\ I_2 100 - I_3 100 &= -7. \end{aligned}$$

Приклади та задачі

Помножимо перше рівняння на 2 і віднімемо від нього друге рівняння. Матимемо:

$$I_3 \cdot 400 = 27, \quad I_3 = \frac{27}{400} = 0,0675 \text{ A.}$$

Підставляючи значення I_3 у друге і третє рівняння, визначимо

$$I_1 = 0,065 \text{ A,}$$

$$I_2 = -0,0025 \text{ A.}$$

2.2.9.2. Метод контурних струмів.

У цьому методі приймаємо, що у кожному контурі тече незалежний від суміжних контурів електричний струм, а струми віток визначаються алгебраїчною сумою струмів контуру, що розглядається, і суміжних контурів, для яких вітка є загальною.

Система рівнянь контурних струмів I_{11}, I_{22}, I_{33} у загальному вигляді для схеми з трьома незалежними контурами має вигляд:

$$\begin{cases} I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} = E_{11} \\ I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23} = E_{22} \\ I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} = E_{33} \end{cases}$$

Струм у окремій вітці дорівнює різниці або сумі контурних струмів суміжних контурів, для яких ця вітка є загальною, залежно від напрямку струмів у цій вітці.

Визначимо струми у вітках наведеної раніше схеми методом контурних струмів.

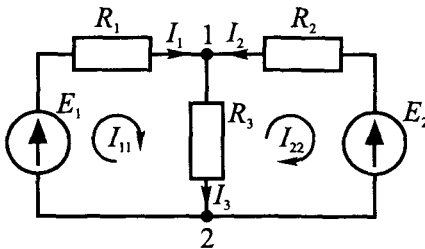


Рис. 2.2.9.2

Розв'язання:

Наведена схема (рис. 2.2.9.2) має два незалежних контури. Довільно вибираємо позитивні напрями контурних струмів і позначаємо їх на

схеми. Для кожного з контурів складаємо рівняння і одержуємо, таким чином, систему рівнянь, в яких невідомими є контурні струми:

$$\begin{cases} I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} = E_{11} \\ I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} = E_{22} \end{cases}$$

де $R_{11} = R_1 + R_3 = 150 \text{ Ом}$ – власний опір першого контуру;

$R_{22} = R_2 + R_3 = 200 \text{ Ом}$ – власний опір другого контуру;

$R_{12} = R_{21} = -R_3 = -100 \text{ Ом}$ – опір суміжної вітки між 1 і 2 контурами. Знак мінус ставиться у тому випадку, коли контурні струми течуть через опір назустріч.

$E_{11} = E_1 = 10 \text{ В}$ – контурна ЕРС 1-го контуру;

$E_{22} = -E_2 = -7 \text{ В}$ – контурна ЕРС 2-го контуру має знак “мінус”, оскільки напрям дії ЕРС протилежний напрямку контурного струму.

Підставляємо цифрові значення у систему рівнянь і розв’язуємо її:

$$\begin{cases} 150I_{11} - 100I_{12} = 10 \\ -100I_{21} + 200I_{22} = -7 \end{cases}$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 10 & -100 \\ -7 & 200 \end{vmatrix} = 1300; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} 150 & 10 \\ -100 & -7 \end{vmatrix} = -50;$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 150 & -100 \\ -100 & 200 \end{vmatrix} = 20000.$$

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = 0,065 \text{ А}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = -0,0025 \text{ А}.$$

Визначаємо струми у вітках схеми:

$$I_1 = I_{11} = 0,065 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{22} = -0,0025 \text{ А};$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22} = 0,0675 \text{ А}.$$

2.2.9.3. Метод накладання (суперпозиції)

Метод накладання базується на принципі накладання, який формулюється таким чином: струм будь-якої вітки електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів, викликаних дією кожного джерела окремо.

Приклади та задачі

Для схеми кола струми методом накладання визначається у такій послідовності.

1. Визначаємо струми, які виникають у колі внаслідок дії ЕРС E_1 (рис. 2.2.9.3)

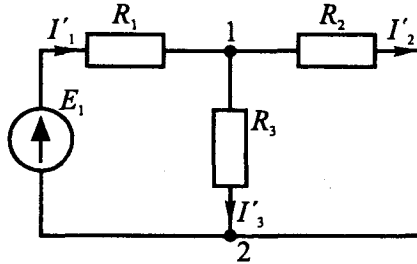


Рис. 2.2.9.3

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)} = \frac{10}{50 + 100 \cdot 100 / (100 + 100)} = 0,1 \text{ A};$$

$$I'_2 = I'_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0,1 \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A};$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 0,1 \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A}.$$

2. Визначаємо струми, які виникають у колі внаслідок дії ЕРС E_2 (рис. 2.2.9.4)

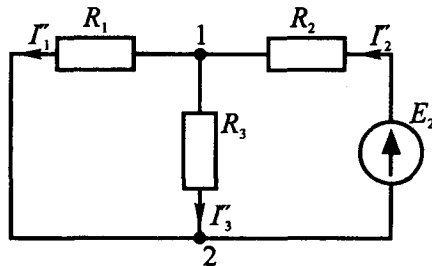


Рис. 2.2.9.4

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_2 + R_1 R_3 / (R_1 + R_3)} = \frac{7}{100 + 50 \cdot 100 / (50 + 100)} = 0,0525 \text{ A};$$

$$I''_1 = I''_2 \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 100 / (50 + 100) = 0,035 \text{ A};$$

$$I_3'' = I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 50 / (50 + 100) = 0,0175 \text{ A.}$$

Дійсні струми у вітках дорівнюють:

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 0,05 + 0,0175 = 0,0675 \text{ A;}$$

$$I_2 = I_2'' - I_2' = 0,0525 - 0,05 = 0,0025 \text{ A;}$$

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 0,1 + 0,035 = 0,065 \text{ A.}$$

2.2.9.4. Метод вузлових потенціалів

За цим методом визначаються потенціали вузлів при заданому нульовому значенні потенціалу будь-якого вузла кола. Метод значно спрощує розрахунки, у порівнянні з методом контурних струмів, коли кількість незалежних вузлів розгалуженого кола менша за кількість незалежних контурів.

Основою методу є 1-й закон Кірхгофа і закон Ома.

Система рівнянь для трьох незалежних вузлів має вигляд:

$$\begin{cases} \varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} = I_{11} \\ -\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} = I_{22}, \\ -\varphi_1 G_{31} - \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} = I_{33} \end{cases}$$

де G_{kk} – алгебраїчна сума провідностей віток, що сходяться у вузлі “ k ”;

G_{km} – алгебраїчна сума провідностей віток між “ k ” і “ m ” вузлами;

I_{kk} – вузловий струм “ k ” – вузла.

Розв’язуючи цю систему рівнянь при відомих ЕРС і провідностях, можна визначити потенціали вузлів, а потім значення струмів у вітках.

Для вихідної схеми визначимо струми у вітках методом вузлових потенціалів.

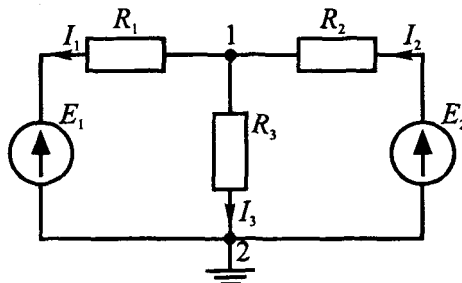


Рис. 2.2.9.5

Приклади та задачі

Розв'язання:

У схемі рис.2.2.9.5 два вузли. Один з вузлів заземлюємо, тобто при-
ймемо $\varphi_2 = 0$.

Запишемо рівняння для вузла 1:

$$\varphi_1 G_{11} = I_{11},$$

$$G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{50} + \frac{1}{100} + \frac{1}{100} = 0,04 \text{ См.}$$

$$I_{11} = E_1 G_1 + E_2 G_2 = 10 \frac{1}{50} + 7 \frac{1}{100} = 0,27 \text{ А.}$$

Визначаємо φ_1 :

$$\varphi_1 = \frac{I_{11}}{G_{11}} = 0,27 / 0,04 = 6,75 \text{ В.}$$

За законом Ома визначаємо струми у вітках схеми:

$$I_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-6,75 + 10}{50} = 0,065 \text{ А;}$$

$$I_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_2}{R_2} = \frac{-6,75 + 7}{100} = 0,0025 \text{ А;}$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_3} = \frac{6,75}{100} = 0,0675 \text{ А.}$$

Задача 2.2.10. Користуючись методом розрахунку розгалужених кіл за законами Кірхгофа, визначити струми у вітках кола (рис 2.2.10), якщо елементи кола містять такі величини: $E_1 = 20 \text{ В}$, $E_2 = 25 \text{ В}$, $E_3 = 40 \text{ В}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 7 \text{ Ом}$, $R_3 = 12 \text{ Ом}$.

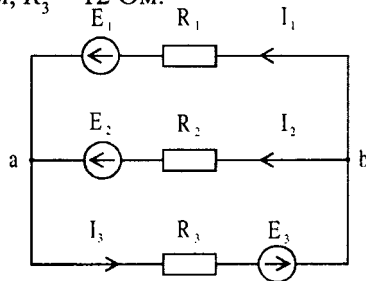


Рис. 2.2.10

Відповідь: $I_1 = 2,01 \text{ А}$, $I_2 = 2,15 \text{ А}$, $I_3 = 4,16 \text{ А}$.

Задача 2.2.11. Застосовуючи метод накладання, визначити струми у вітках кола (рис. 2.2.11) при різних напрямках дії електрорушійних сил. Елементи, що складають коло, мають такі величини: $E_1 = 8 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$, $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 6 \text{ Ом}$.

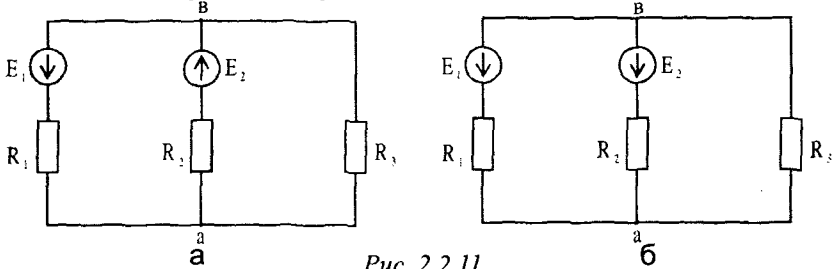


Рис. 2.2.11

Відповіді: а) $I_1 = 1,873 \text{ А}$; $I_2 = 1,476 \text{ А}$; $I_3 = 0,397 \text{ А}$;
 б) $I_1 = 0,921 \text{ А}$; $I_2 = 0,048 \text{ А}$; $I_3 = 0,873 \text{ А}$.

Задача 2.2.12. Для кола, наведеного на рис. 2.2.12, визначити напругу між точками $a - b$ і струми, що течуть у вітках. Відомо, що $E_1 = 127 \text{ В}$, $E_2 = 65 \text{ В}$, $E_3 = 110 \text{ В}$, $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 12 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$.

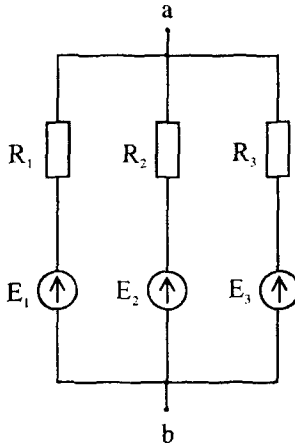


Рис 2.2.12

Відповідь: $I_1 = 3,269 \text{ А}$; $I_2 = 3,531 \text{ А}$; $I_3 = 0,262 \text{ А}$; $U_{ab} = 107,4 \text{ В}$.

Задача 2.2.13. Визначити струми у вітках кола (рис. 2.2.13), користуючись методом контурних струмів, якщо величини елементів кола мають

Приклади та задачі

такі значення: $E_1 = 20 \text{ В}$, $E_4 = 30 \text{ В}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$, $R_4 = 1 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$.

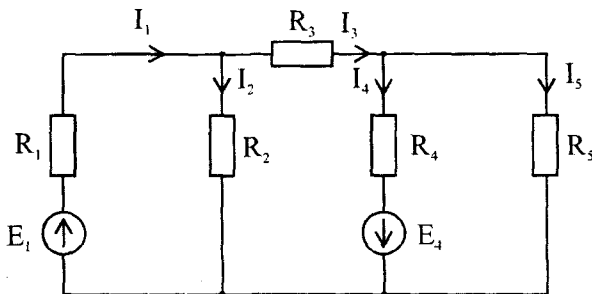


Рис 2.2.13

Відповідь: $I_1 = 11,79 \text{ А}$; $I_2 = 4,098 \text{ А}$; $I_3 = 7,69 \text{ А}$; $I_4 = 15,12 \text{ А}$; $I_5 = 7,429 \text{ А}$.

Задача 2.2.14. Для кола, зображеного на рис 2.2.14, визначити струми у вітках, користуючись методом контурних струмів. Елементи кола мають такі параметри: $E_1 = 70 \text{ В}$, $E_2 = 15 \text{ В}$, $E_3 = 10 \text{ В}$, $E_4 = 20 \text{ В}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 8 \text{ Ом}$, $R_4 = 10 \text{ Ом}$, $R_5 = 3 \text{ Ом}$.

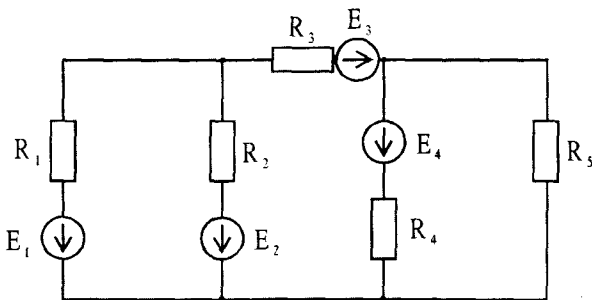


Рис. 2.2.14

Відповідь: $I_1 = 5,477 \text{ А}$; $I_2 = 2,761 \text{ А}$; $I_3 = 2,716 \text{ А}$; $I_4 = 0,911 \text{ А}$; $I_5 = 3,627 \text{ А}$.

Задача 2.2.15. Визначити струми у вітках кола (рис. 2.2.15), використовуючи метод суперпозиції та контурних струмів. Елементи кола мають такі параметри: $E_1 = 120 \text{ В}$, $E_4 = 200 \text{ В}$, $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 70 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_5 = 60 \text{ Ом}$.

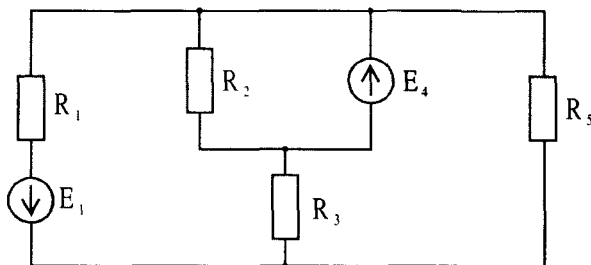


Рис. 2.2.15

Відповідь: $I_1 = 1,908 \text{ A}$; $I_2 = 2,857 \text{ A}$; $I_3 = 1,497 \text{ A}$; $I_4 = 4,354 \text{ A}$; $I_5 = 0,410 \text{ A}$.

Задача 2.2.16. На рис. 2.2.15 наведена схема розгалуженого кола, ЕРС джерел і опори резисторів мають такі величини: $E_1 = 80 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$, $E_4 = 100 \text{ В}$, $E_5 = 70 \text{ В}$, $E_6 = 20 \text{ В}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$, $R_4 = 2 \text{ Ом}$, $R_5 = 1 \text{ Ом}$, $R_6 = 3 \text{ Ом}$. Визначити струми у вітках, користуючись методом контурних струмів.

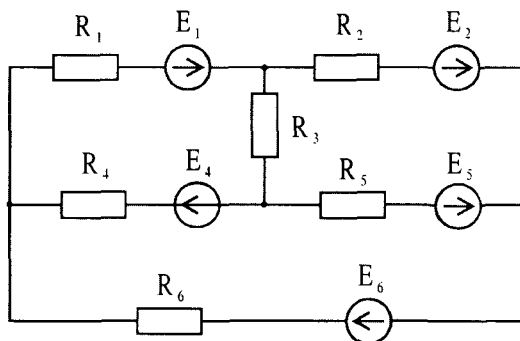


Рис. 2.2.16

Відповідь: $I_1 = 49,55 \text{ А}$; $I_2 = 26,32 \text{ А}$; $I_3 = 23,24 \text{ А}$, $I_4 = 30,31 \text{ А}$, $I_5 = 7,075 \text{ А}$, $I_6 = 19,24 \text{ А}$.

Задача 2.2.17. Для кола, зображеного на рис. 2.2.17, відомі параметри елементів, що його складають: $E_5 = 200 \text{ В}$, $E_6 = 150 \text{ В}$, $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 20 \text{ Ом}$. Визначити струми у вітках, користуючись методом накладання.

Приклади та задачі

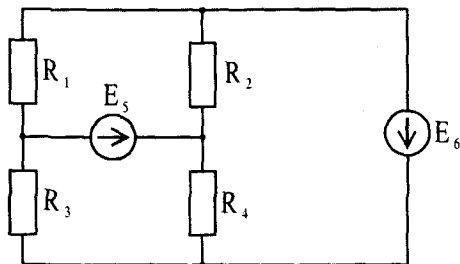


Рис. 2.2.17

Відповідь: $I_1 = 1,25$ А; $I_2 = 7,49$ А; $I_3 = 12,48$ А; $I_4 = 3,75$ А; $I_5 = 11,23$ А, $I_6 = 8,74$ А.

Задача 2.2.18. У колі (рис. 2.2.18) найпростішим методом визначити струми у вітках, якщо відомі ЕРС джерел і опори резисторів: $E_1 = 60$ В, $E_2 = 40$ В, $E_3 = 30$ В, $R_1 = 8$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 12$ Ом, $R_4 = 16$ Ом.

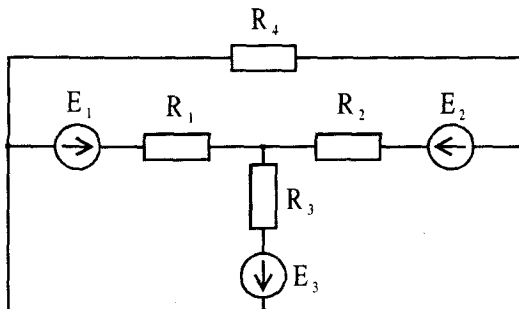


Рис. 2.2.18

Відповідь: $I_1 = 3,85$ А; $I_2 = 1,081$ А; $I_3 = 4,932$ А, $I_4 = 0$ А.

Задача 2.2.19. Використовуючи найпростіший метод розрахунку кіл, визначити величини електрорушійних сил, що містяться у колі, наведеному на рис. 2.2.19. Величини струмів у вітках дорівнюють: $I_1 = 3,85$ А, $I_2 = 11,52$ А, $I_3 = 15,37$ А, а опори мають величини: $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 8$ Ом.

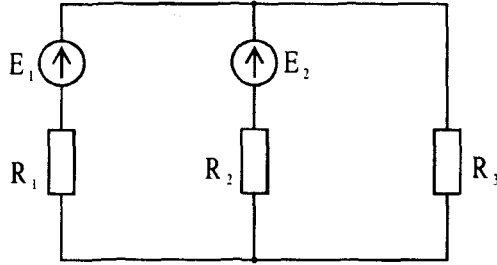


Рис. 2.2.19

Відповідь: $E_1 = 146,14 \text{ В}$, $E_2 = 169,16 \text{ В}$.

Задача 2.2.20. На рис. 2.2.20 наведена схема нерозгалуженого кола з двома джерелами, електрорушійні сили яких дорівнюють $E_1 = 18 \text{ В}$ і $E_2 = 12 \text{ В}$. Опори мають такі величини: $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$. Визначити струм, що протікає у колі, і потенціали точок та побудувати потенціальну діаграму.

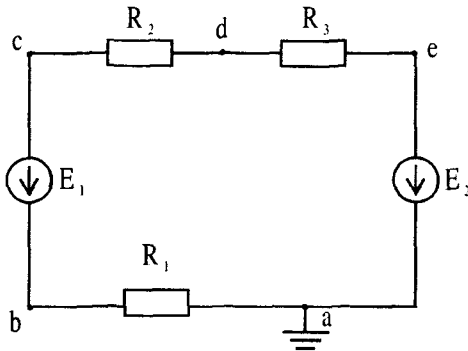


Рис. 2.2.20

Відповідь: $I = 0,5 \text{ А}$, $\varphi_a = 0 \text{ В}$, $\varphi_b = 3 \text{ В}$, $\varphi_c = -15 \text{ В}$, $\varphi_d = -13 \text{ В}$, $\varphi_e = -12 \text{ В}$.

2.3. НЕЛІНІЙНІ КОЛА

Задача 2.3.1. Нелінійний опір R_1 , вольт-амперна характеристика якого наведена на рисунку 2.3.1.1, і лінійний опір $R_2 = 500 \text{ Ом}$, з'єднані послідовно (рис. 2.3.1.2). Напряга на затискачах кола $U = 600 \text{ В}$.

Визначити струм кола і напругу на її ділянках.

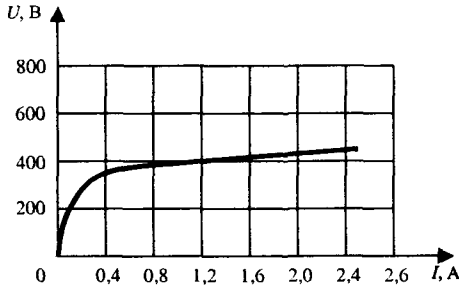


Рис. 2.3.1.1

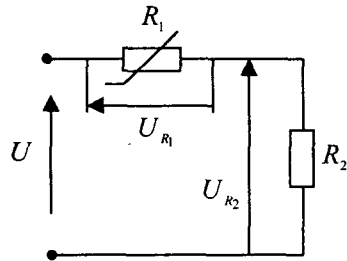


Рис. 2.3.1.2

Розв'язання:

1. Будуємо вольт-амперну характеристику для лінійного опору. Задаємо дві точки:

$$U_0 = 0; I_0 = 0 \text{ — точка 0,}$$

$$U_A = 600 \text{ В}; I_A = \frac{600}{500} = 1,2 \text{ А — точка 1.}$$

і через них проводимо пряму лінію, яка є вольт-амперною характеристикою опору R_2 .

2. Будуємо вольт-амперну характеристику всього кола (рис. 2.3.1.3), тобто залежність напруги від струму на затискачах кола. Для цього проводимо декілька прямих ліній паралельно вісі ординат із наперед заданих значень струму і, складаючи значення напруг на кожному з опорів при заданому струмові, визначимо загальне падіння напруги на цих опорах, що і буде ординатою загальної вольт-амперної характеристики.

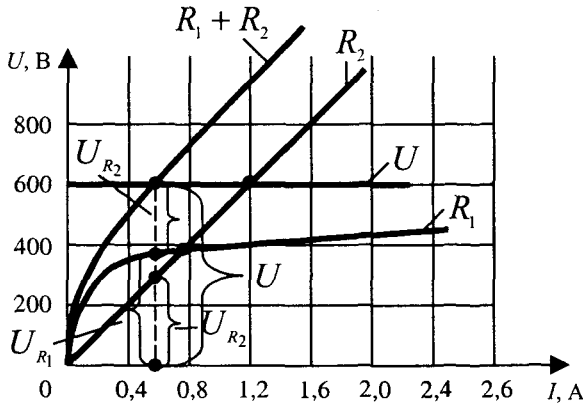


Рис. 2.3.1.3

Струм у колі і напруги на опорах при цьому дорівнюватимуть:

$$I = 0,52 \text{ A}, \quad U_{R_1} = 350 \text{ В}, \quad U_{R_2} = 250 \text{ В}.$$

Задача 2.3.2. Коло складається зі з'єднаних паралельно (рис. 2.3.2.1) лінійного і нелінійного опорів. Струм у нерозгалуженій частині $I = 1,2 \text{ А}$; $R_1 = 550 \text{ Ом}$. Визначити напругу на затискачах кола і струми у вітках, якщо відома вольт-амперна характеристика опору R_2 .

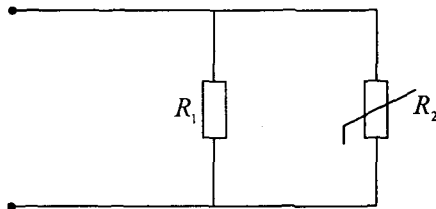


Рис. 2.3.2.1

Розв'язання:

1. Будемо результуючу вольт-амперну характеристику всього кола рис. 2.3.2.2.

Для цього проводимо декілька прямих ліній паралельно вісі абсцис, i , складаючи значення струмів, одержаних попарно з вольт-амперних характеристик окремих елементів при різних значеннях напруги, знаходимо значення струмів у нерозгалуженій частині кола при тих же напругах і будемо вольт-амперну характеристику.

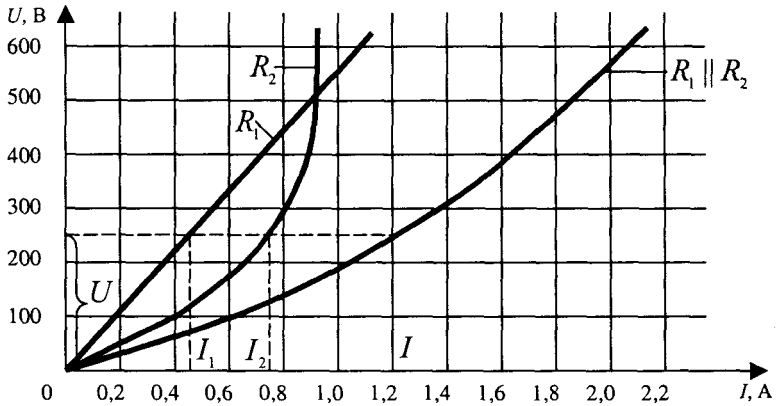


Рис. 2.3.2.2

1. За допомогою вольт-амперних характеристик визначаємо напру-гу на затискачах кола і струм у вітках.

$$U = 250 \text{ B,}$$

$$I_1 = 0,45 \text{ A,}$$

$$I_2 = 0,75 \text{ A.}$$

Задача 2.3.3. Визначити значення опору R , який включено послідовно з терморезистором, щоб забезпечити струм кола 3 мА при напрузі на її затискачах $U = 60$ В. Характеристика терморезистора наведена на рисунку 2.3.3.

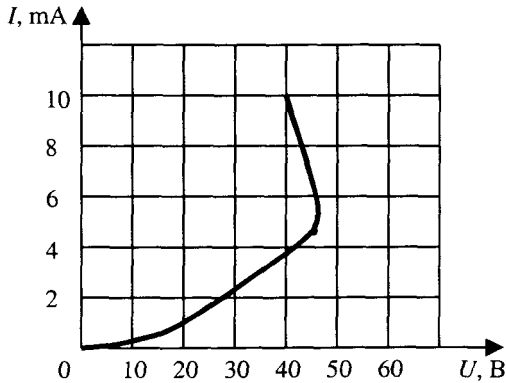


Рис. 2.3.3

Відповідь: $R = 8,3 \text{ кОм.}$

2.4. КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Задача 2.4.1. До джерела живлення, діюче значення напруги якого дорівнює $U = 110$ В, а частота $f = 50$ Гц, по чергово вмикаються активний опір $R = 36$ Ом, індуктивність $L = 50$ мГн і ємність $C = 150$ мкФ (рис. 2.4.1).

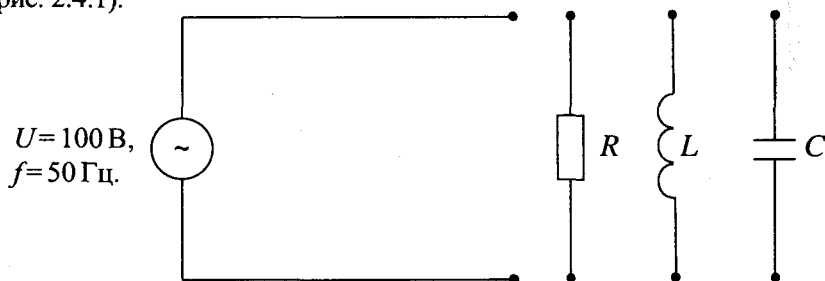


Рис. 2.4.1

Визначити:

1. Амплітудне значення напруги.
2. Діючі й амплітудні значення струмів при включенні кожного з елементів.

3. Записати вирази миттєвих значень напруги і струмів.
4. Побудувати векторні діаграми.

Розв'язання:

1. Амплітудне значення напруги дорівнює:

$$U_m = \sqrt{2}U = 1,41 \cdot 110 = 155,1 \text{ В.}$$

2. Миттєве значення напруги:

$$u = 155,1 \sin \omega t, \text{ В.}$$

3. Діючі, амплітудні і миттєві значення струмів у колі при включенні:

- а) активного опору:

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{110}{36} = 3,05 \text{ А;}$$

$$I_{mR} = \sqrt{2}I = 1,41 \cdot 3,05 = 4,3 \text{ А;}$$

$$i = 4,3 \sin \omega t, \text{ А.}$$

Приклади та задачі

б) індуктивності:

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L} = \frac{110}{314 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 7 \text{ A};$$

$$\omega = 2\pi f; \quad \omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$I_{mL} = \sqrt{2} \cdot I = 1,41 \cdot 7 = 9,9 \text{ A};$$

$$i_L = 9,9 \cdot \sin(\omega t - 90^\circ), \text{ A};$$

с) ємності:

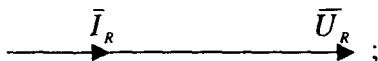
$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \omega C U = 314 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 110 = 5,2 \text{ A};$$

$$I_{mC} = \sqrt{2} I_C = 1,41 \cdot 5,2 = 7,3 \text{ A};$$

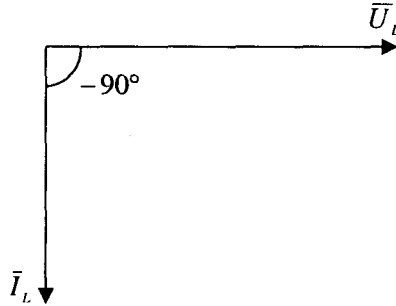
$$i_C = 7,3 \sin(\omega t + 90^\circ), \text{ A}.$$

4. Побудуємо векторні діаграми:

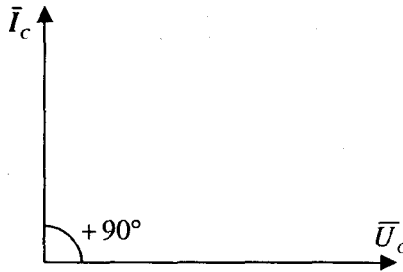
а) для активного опору векторна діаграма являє собою графічне зображення векторів діючих або амплітудних значень напруги і струму, які мають однаковий напрям. У вибраному масштабі $m_U = 20 \text{ В/см}$, $m_i = 2 \text{ А/см}$ векторна діаграма має вигляд:



б) Для індуктивності векторна діаграма являє собою вектор напруги \vec{U}_L , розташований горизонтально, і вектор струму \vec{I}_L , розташований під кутом -90° до вектора напруги \vec{U}_L , які відображені з однієї точки у вибраному масштабі. Вектор струму \vec{I}_L , відстає від вектора напруги \vec{U}_L на кут 90° при їх обертанні у позитивному напрямі (проти годинникової стрілки):



с) Для ємності векторна діаграма являє собою вектор \bar{U}_C , розташований горизонтально, і вектор струму \bar{I}_C , що випереджає вектор напруги на 90° :



Задача 2.4.2. Коло містить послідовно з'єднані елементи: резистор, котушку і конденсатор (рис. 2.4.2.1). Опір резистора $R = 6 \text{ Ом}$, активний опір котушки $R_K = 2 \text{ Ом}$, індуктивність котушки $L_K = 50 \text{ мГн}$, ємність конденсатора $C = 150 \text{ мкФ}$. До затискачів кола підведена напруга $U = 100 \text{ В}$, частотою $f = 100 \text{ Гц}$.

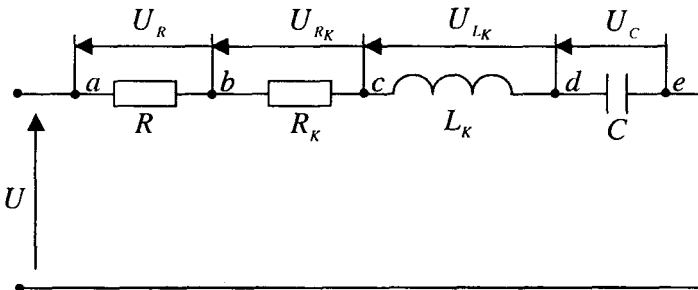


Рис. 2.4.2.1

Приклади та задачі

Визначити струм, що тече у колі, і напругу на всіх елементах. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язання:

Визначимо повний опір кола:

$$Z = \sqrt{(R_x + R)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 = 628 \text{ рад/с},$$

$$X_x = X_L = \omega L_x = 628 \cdot 30 = 18,84 \text{ Ом},$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{628 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 10,62 \text{ Ом},$$

$$Z = \sqrt{(6+2)^2 + (18,84 - 10,62)^2} = \sqrt{64 + 67,57} = 11,47 \text{ Ом}.$$

Визначаємо повний опір котушки:

$$Z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2} = \sqrt{2^2 + 18,84^2} = \sqrt{4 + 354,9} = 18,94 \text{ Ом}.$$

Струм у колі буде дорівнювати:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{11,47} = 8,72 \text{ А}.$$

Напруга на окремих ділянках кола:

$$U_{ab} = U_R = I \cdot R = 11,47 \cdot 6 = 68,82 \text{ В},$$

$$U_{bc} = U_{R_x} = I \cdot R_x = 11,47 \cdot 2 = 22,94 \text{ В},$$

$$U_{cd} = U_{L_x} = I \cdot X_x = 11,47 \cdot 18,84 = 216,09 \text{ В},$$

$$U_{dc} = U_C = I \cdot X_C = 11,47 \cdot 10,62 = 121,81 \text{ В},$$

$$U_{bd} = U_x = I \cdot Z_x = 11,47 \cdot 18,84 = 217,24 \text{ В}.$$

Визначаємо кут між векторами напруги \bar{U} , що прикладена до застискачів кола, і струму \bar{I} :

$$\varphi = \arctg \frac{X_x - X_C}{R_x + R} = \arctg \frac{18,84 - 10,62}{6 + 2} = \arctg \frac{8,22}{8} = \arctg 1,03 = 45,8^\circ.$$

Вектор напруги на котушці \bar{U}_k випереджає вектор струму I на кут:

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k} = \arctg \frac{18,84}{2} = \arctg 9,42 = 83,9^\circ.$$

Для побудови векторної діаграми виберемо масштаб для напруг $m_U = 20 \text{ В/см}$ і струму $m_I = 1 \text{ А/см}$. Побудова векторної діаграми (рис. 2.4.2.2) починається з розташування горизонтально, не зважаючи на початкову фазу, у масштабі вектора струму \bar{I} , який має однакову величину у всіх елементах схеми і є базовим, від якого йде відлік кутів всіх інших векторів. Потім відкладають вектор напруги \bar{U}_R , що сходиться за напрямом зі струмом. Під кутом $\varphi_k = 83,9^\circ$ у позитивному напрямі відліку кутів, тобто проти годинникової стрілки, відкладають вектор напруги на котушці \bar{U}_k , а під кутом -90° — до вектора струму \bar{I} , тобто у негативному напрямку відліку кутів, вектор напруги на ємності \bar{U}_C . Геометрична сума векторів напруг ділянок кола $\bar{U}_R, \bar{U}_k, \bar{U}_C$ визначає вектор напруги \bar{U} на затискачах кола.

Векторна діаграма частіше будується по іншому (рис. 2.4.2.3). Також відкладається у масштабі m_I вектор струму \bar{I} . За його напрямом відкладається у масштабі m_U вектор напруги на резисторі \bar{U}_R , а з кінця цього вектора відкладається напруга на активному опорі котушки \bar{U}_{R_k} за напрямом струму. Сума цих векторів визначає напругу U_{ac} . З кінця вектора \bar{U}_{R_k} під кутом 90° у позитивному напрямі відліку кутів від вектора струму \bar{I} відкладають вектор напруги $\bar{U}_{L_k} = \bar{U}_{cd}$, а з його кінця — у протилежному напрямі, тобто під кутом -90° до вектора струму відкладають вектор напруги $\bar{U}_C = \bar{U}_{de}$. Вектор напруги \bar{U} , що прикладена до затискачів кола, з'єднує початок вектора \bar{U}_R з кінцем вектора \bar{U}_C і являє собою геометричну суму векторів напруг кола на окремих його елементах.

Приклади та задачі

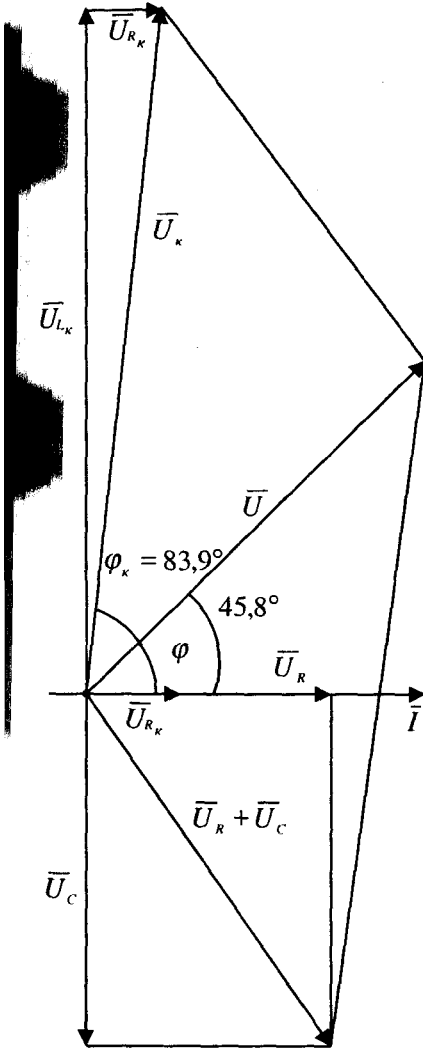


Рис. 2.4.2.2

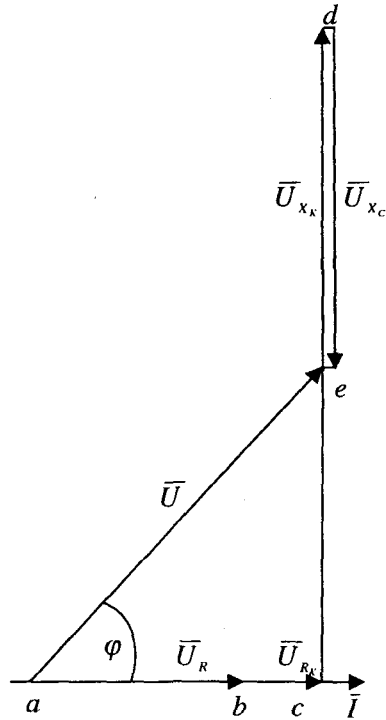


Рис. 2.4.2.3

Задача 2.4.3. До кола з активним опором $R = 20$ Ом прикладена напруга $u = 140 \sin 314t$, В. Написати вираз для миттєвого значення струму і побудувати графік зміни струму і напруги.

Відповідь: $i = 7 \sin 314t$, А.

Задача 2.4.4. Коло містить конденсатор ємністю 10 мкФ, який знаходиться під напругою $u = 640 \sin \omega t$, В. Написати вираз для миттєвого значення струму і побудувати графік струму і напруг.

Відповідь: $i = 0,0064 \omega \sin(\omega t + 90^\circ)$, А.

Задача 2.4.5. Коло з послідовним з'єднанням резистора, опір якого дорівнює 20 Ом, і конденсатора, ємність якого 100 мкФ, підключено до джерела живлення з напругою 220 В і частотою 50 Гц. Визначити діюче значення і вираз для миттєвого значення струму і побудувати векторну діаграму.

Відповідь: $i = 8,3 \sin(314t + 58^\circ)$, А.

Задача 2.4.6. Реактивний опір котушки дорівнює її активному опору. При напрузі 200 В, підведеної до неї, потужність котушки дорівнює 2000 Вт. Визначити значення струму, активний опір і коефіцієнт потужності.

Відповідь: $I = 14,3$ А, $R = 9,8$ Ом, $\cos \varphi = 0,707$.

Задача 2.4.7. Коло містить котушку, індуктивність якої дорівнює 0,04 Гн, активний опір 10 Ом, яка послідовно з'єднана з конденсатором ємністю 400 мкФ. Напруга живлення дорівнює 220 В, а частота 50 Гц.

Визначити діюче значення струму і кут зсуву фаз між напругою і струмом, а також напруги на котушці і конденсаторі.

Відповідь: $I = 20$ А, $\varphi = 24,7^\circ$, $U_K = 321$ В, $U_C = 159$ В.

Задача 2.4.8. Опір R , індуктивність $L = 0,15$ Гн і ємність C з'єднані послідовно і підключені до джерела живлення 220 В частотою 50 Гц. Струм у колі 11 А, активна потужність — 300 Вт. Визначити активний опір і ємність. Побудувати векторну діаграму.

Відповідь: $R = 2,48$ Ом, $C = 117$ мкФ.

Задача 2.4.9. Визначити співвідношення між активною і реактивною потужностями, при $\cos \varphi = 0,707$.

Відповідь: $P : Q = 1 : 1$.

Задача 2.4.10. Для кола з рис. 2.4.10 відомо, що $I_1 = 10$ А, $I_2 = 16$ А,

Приклади та задачі

$I = 20 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$. Визначити активний опір R_2 , індуктивність L_2 і $\cos \varphi_2$.

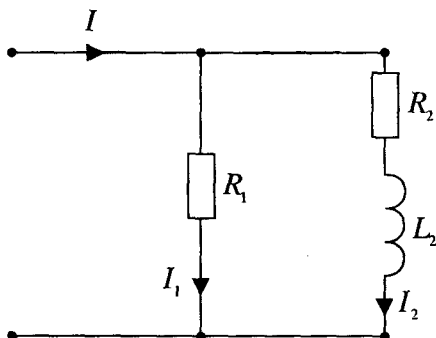


Рис. 2.4.10

Відповідь: $R_2 = 0,87 \text{ Ом}$, $L_2 = 19,7 \text{ мГн}$, $\cos_2 \varphi = 0,14$.

Задача 2.4.11. Коло містить дві активно-індуктивні вітки (рис. 2.4.11) $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $X_{L1} = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 15 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 20 \text{ Ом}$. Напруга, що прикладена до затискачів, має діюче значення 125 В , частота 50 Гц . Визначити струми у вітках і нерозгалуженій частині кола, активну і реактивну потужності кожної вітки і всього кола.

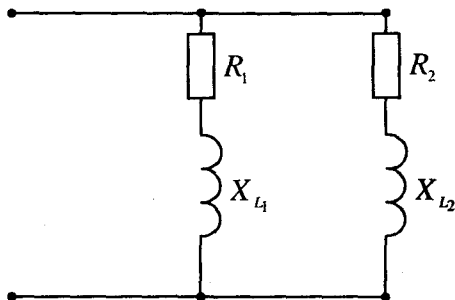


Рис. 2.4.11

Відповідь: $I_1 = 5 \text{ A}$, $I_2 = 5 \text{ A}$, $P_1 = 500 \text{ Вт}$, $Q_1 = 375 \text{ ВАР}$, $P_2 = 375 \text{ Вт}$, $Q_2 = 500 \text{ ВАР}$, $P = 875 \text{ Вт}$, $Q = 875 \text{ ВАР}$.

Задача 2.4.12. Коло, схема якого наведена на рис. 2.4.12, має три паралельно з'єднаних вітки, величини опорів елементів мають такі значення: $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $X_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $X_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 12 \text{ Ом}$.

Визначити активні і реактивні провідності, струми кожної з віток і всієї схеми, якщо діюче значення напруги на затискачах дорівнює 110 В, а частота 50 Гц.

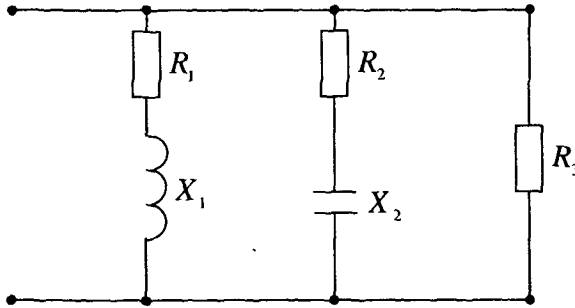


Рис. 2.4.12

Відповідь: $I_1 = 11 \text{ А}$, $I_2 = 7,8 \text{ А}$, $I_3 = 9,16 \text{ А}$, $I = 23,1 \text{ А}$.
 $g_1 = 0,08 \text{ См}$, $b_1 = 0,06 \text{ См}$, $g_2 = 0,05 \text{ См}$, $b_2 = 0,05 \text{ См}$,
 $g_3 = 0,08 \text{ См}$, $b_3 = 0 \text{ См}$, $g = 0,213 \text{ См}$, $b = 0,11 \text{ См}$.

Задача 2.4.13. Для кола (рис. 2.4.13), що містить дві паралельні вітки, визначити еквівалентний опір відносно затискачів a, b , якщо $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $X_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 6 \text{ Ом}$, $X_2 = 8 \text{ Ом}$,

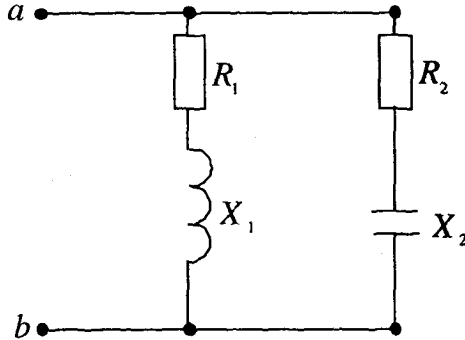


Рис. 2.4.13

Відповідь: $Z_{\text{екв}} = 5 \text{ Ом}$.

Задача 2.4.14. На рис. 2.4.14 наведена схема розгалуженого кола. Визначити струми у вітках, якщо діюче значення напруги на затискачах кола, при частоті 50 Гц дорівнює 100 В. Параметри елементів кола

Приклади та задачі

такі: $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $X_{L1} = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 6 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 8 \text{ Ом}$, $X_C = 6 \text{ Ом}$.

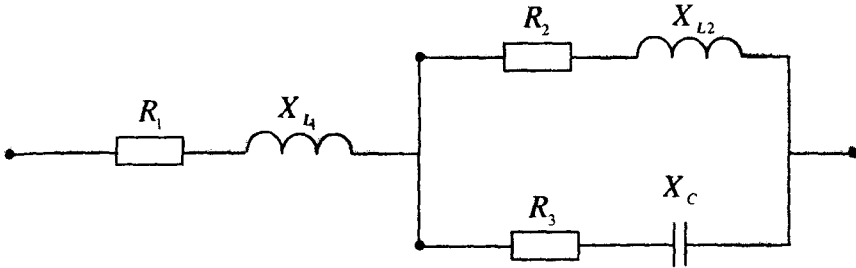


Рис. 2.4.14

Побудувати векторну діаграму.

Відповідь: $I_1 = 11,2 \text{ А}$, $I_2 = 6,3 \text{ А}$, $I_3 = 4,9 \text{ А}$.

Задача 2.4.15. У мережу з напругою $U = 127 \text{ В}$ і частотою $f = 60 \text{ Гц}$ увімкнуті з'єднані паралельно дві котушки з параметрами: $R_{K1} = 3,5 \text{ Ом}$, $L_{K1} = 29,4 \text{ мГн}$, $R_{K2} = 8,7 \text{ Ом}$, $L_{K2} = 8,1 \text{ мГн}$.

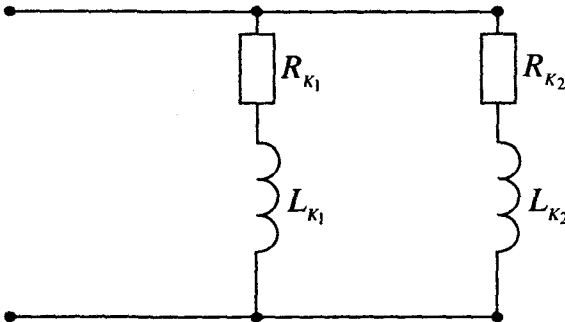


Рис. 2.4.15

Визначити струми у колі, напруги на індуктивностях і опорах.

Відповідь: $I_1 = 10,9 \text{ А}$, $I_2 = 13,8 \text{ А}$, $U_{R_{K1}} = 38,2 \text{ В}$, $U_{R_{K2}} = 120 \text{ В}$, $U_{L_{K1}} = 121 \text{ В}$, $U_{L_{K2}} = 42,1 \text{ В}$.

Задача 2.4.16. Коло з послідовно з'єднаними котушкою з активним опором 8 Ом й індуктивністю $0,07 \text{ Гн}$ і конденсатором ємністю 122 мкФ , підімкнене до мережі з діючим значенням напруги 120 В частотою 50 Гц . Визначити струм у колі, напруги на котушці і конденсаторі,

активну і реактивну потужності. Побудувати векторну діаграму. Визначити частоту f_0 , за якої має місце резонанс напруг.

Відповідь: $I = 13,3 \text{ А}$, $U_K = 311,3 \text{ В}$, $U_C = 347,1 \text{ В}$, $P = 1415 \text{ Вт}$, $Q = 725 \text{ ВАр}$, $f_0 = 54,5 \text{ Гц}$.

Задача 2.4.17. При частоті 50 Гц синусоїдного струму повний опір котушки дорівнює 41 Ом, а при постійному струмові – 9 Ом. За якої частоти у контурі виникне резонанс, якщо цю котушку з'єднати послідовно з конденсатором 51 мкФ?

Відповідь: 62 Гц.

Задача 2.4.18. Паралельно котушці з параметрами $R = 4 \text{ Ом}$, $L = 0,01 \text{ Гн}$ приєднано конденсатор, ємність якого 100 мкФ. Визначити резонансну частоту.

Відповідь: 156 Гц.

Задача 2.4.19. Задані комплексні значення напруг і струмів:

$$U = (+20 + j40) \text{ В}; I = (5 + j3) \text{ А};$$

$$U = (-20 - j40) \text{ В}; I = (5 - j3) \text{ А};$$

$$U = (20 - j40) \text{ В}; I = (-5 - j3) \text{ А}.$$

Записати ці значення у показниковій і тригонометричній формах.

Відповідь:

$$U = 44,7 \cdot e^{j63,4^\circ}, I = 5,8 \cdot e^{j31^\circ} = 5,8 \cos 31^\circ + j5,8 \sin 31^\circ;$$

$$U = 44,7 \cdot e^{j243,4^\circ}, I = 5,8 \cdot e^{-j31^\circ} = 5,8 \cos 31^\circ - j5,8 \sin 31^\circ;$$

$$U = 44,7 \cdot e^{-j63,9^\circ}, I = 5,8 \cdot e^{j211^\circ} = 5,8 \cos 211^\circ + j5,8 \sin 211^\circ.$$

Задача 2.4.20. Використовуючи закон Ома, визначити струм у колі з послідовним з'єднанням R, L, C , якщо $R = 4 \text{ Ом}$, $X_L = j10 \text{ Ом}$, $X_C = -j7 \text{ Ом}$. Напряга, прикладена до затискачів кола, дорівнює $\dot{U} = 125 + j5 \text{ В}$.

Розв'язання. Відповідно до закону Ома, струм дорівнює:

$$i = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}},$$

Z – повний опір кола:

$$\begin{aligned}\underline{Z} &= R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}} = Z \cdot e^{j \arctg \frac{X_L \cdot X_C}{R}};\end{aligned}$$

$$\underline{Z} = 4 + j(10 - 7) = 4 + j3 = \sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \arctg \frac{10-7}{4}} = 5 \cdot e^{j37^\circ} \text{ Ом};$$

$$i = \frac{125 + j5}{4 + j3} \text{ Ом.}$$

Помножимо знаменник і чисельник на спряжене число комплексному числу знаменника:

$$\begin{aligned}i &= \frac{(125 + j5)(4 - j3)}{(4 + j3)(4 - j3)} = \frac{500 + j20 - j375 + 15}{16 + j12 - j12 + 9} = \frac{515 - j355}{25} = \\ &= 20,6 - j14,2 = 25e^{-j35^\circ} \text{ А.}\end{aligned}$$

2.5. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

Задача 2.5.1. Навантаження складається з трьох однофазних споживачів (рис. 2.5.1.1), активний опір кожного з яких однаковий і дорівнює 50 Ом ($\cos \varphi = 1$), з'єднаних зіркою і приєднаних до джерела, лінійна напруга якого дорівнює 380 В, за допомогою трьох фазних і нульового проводів.

Визначити фазну напругу і струми, побудувати векторні діаграми для симетричного і несиметричного навантаження, тобто коли всі споживачі ввімкнуті, включено два споживача і один споживач. Опором нульового і фазного проводів нехтувати.

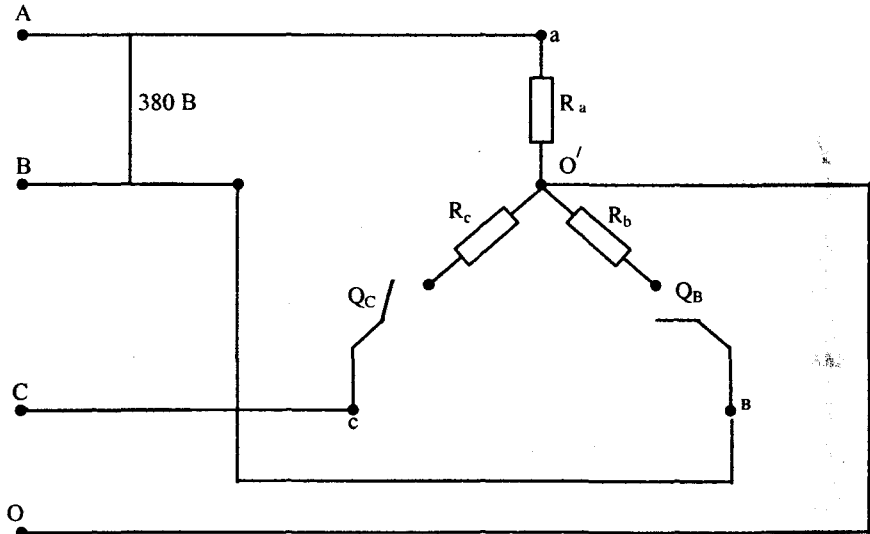


Рис 2.5.1.1

Розв'язання:

1. Визначаємо фазні напруги:

$$\dot{U}_{ao'} = \frac{\dot{U}_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{bo'} = 220 e^{-j120^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{co'} = 220 e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

2. Визначаємо струми при симетричному навантаженні:

$$i_a = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A};$$

$$\dot{i}_b = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50} = 4,4e^{-j120^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{i}_c = \frac{220e^{j120^\circ}}{50} = 4,4e^{j120^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{i}_{00'} = \dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c = 4,4(1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = 4,4 \times 0 = 0 \text{ A}.$$

Векторна діаграма має вигляд:

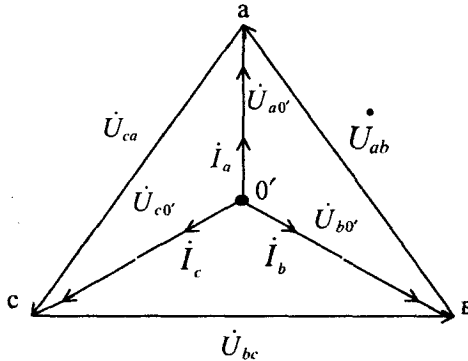


Рис. 2.5.1.2

Якщо увімкнути у мережу тільки один споживач R_A , вимикачі Q_B, Q_C розімкнуті, то струми будуть текти тільки в фазі A і нульовому проводі, тобто $I_A = I_N$:

$$I_a = I_N = \frac{U_{a0'}}{R_a} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A}.$$

Векторна діаграма для цього випадку матиме вигляд, як на рис. 2.5.1.3.

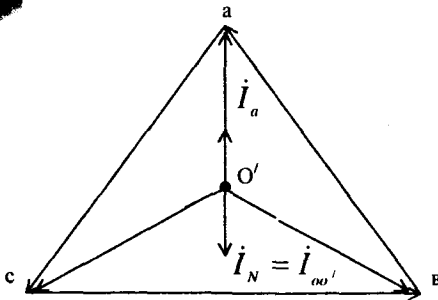


Рис. 2.5.1.3

Якщо будуть увімкнуті два споживачі R_A і R_B (вимикач Q_B увімкнутий), то струми, що течуть крізь опори споживачів, будуть однакові за величиною, а аргументи будуть відрізнятися на кут 120° .

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_{a0'}}{R_A} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_{b0'}}{R_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50} = 4,4e^{-j120^\circ} = 4,4e^{j240^\circ} \text{ А.}$$

Струм у нульовому проводі дорівнюватиме сумі струмів:

$$\begin{aligned} \dot{I}_N = \dot{I}_{00'} &= \dot{I}_a + \dot{I}_b = \dot{I}_a + \dot{I}_b = \dot{I}_a e^{j0^\circ} + \dot{I}_b e^{j240^\circ} = I_a + I_b \cos 240^\circ + jI_b \sin 240^\circ = \\ &= 4,4 + 4,4 \cos 240^\circ = j4,4 \sin 240^\circ = 4,4(1 + \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) = \\ &= 4,4(1 - 0,5 - j0,86) = 2,2 - j3,8 = 4,4e^{-j60^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Векторна діаграма для цього випадку має вигляд:

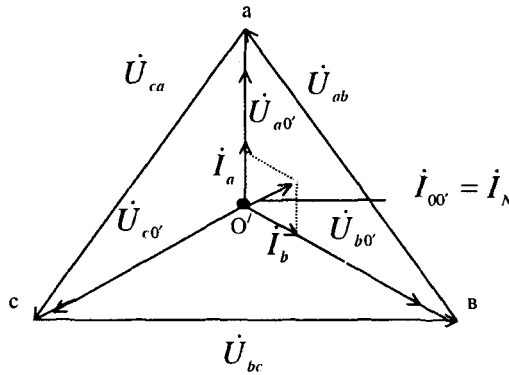


Рис. 2.5.2

Задача. 2.5.2. Визначити модуль комплексного опору кола з послідовним з'єднанням активного опору $R = 4$ Ом, індуктивності $L = 0,03$ Гн і ємності $C = 0,0005$ Ф. Частота мережі $f = 50$ Гц.

Розв'язання:

Визначаємо модуль комплексного опору кола:

$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad \varphi = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с;}$$

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 0,03 = 9,4 \text{ Ом, } X_C = \frac{1}{0,0005 \cdot 314} = \frac{1}{0,157} = 6,4 \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z} = 4 + j(9,4 - 6,4) = 4 + j3 = \sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \arctg \frac{3}{4}} = 5 \cdot e^{j36^\circ,86^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z} = 4 + j3 = 5 \cdot e^{j36^\circ,86^\circ} = 5 \cdot \cos 36^\circ,86^\circ - j5 \sin 36^\circ,86^\circ.$$

Задача 2.5.3. Три приймачі (рис. 2.5.3), з'єднані у трикутник, під'єднані до мережі, лінійні напруги якої симетричні, а діючі значення дорівнюють 380 В. Комплексні опори дорівнюють:

$$\underline{Z}_{AB} = 33 + j19 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{BC} = 33 - j19 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{CA} = 38 \text{ Ом}.$$

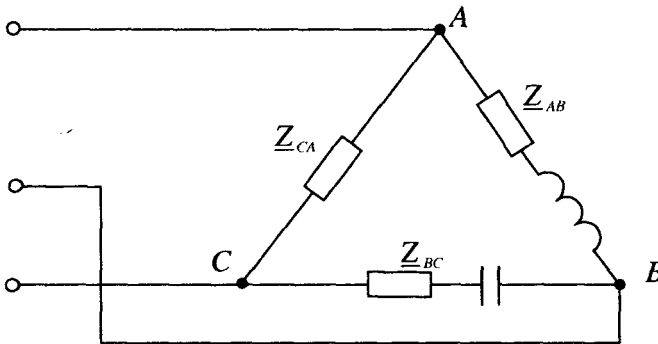


Рис. 2.5.3

Визначити лінійні і фазні струми, побудувати векторну діаграму.

Розв'язання:

1. Для приймачів, з'єднаних у трикутник, маємо наступні співвідношення між фазними струмами і напругами:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}; \quad U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

Опір $\underline{Z}_{AB} = 33 + j19 \text{ Ом}$ має активно-індуктивний характер, так як перед j стоїть знак плюс.

Опір $\underline{Z}_{BC} = 33 - j19 \text{ Ом}$ має активно-ємнісний характер, так як перед j стоїть знак мінус.

Опір \underline{Z}_{CA} має активний характер, так як у виразі $\underline{Z}_{CA} = 38 \text{ Ом}$ відсутня уявна частина.

2. Визначимо фазні струми:

$$i_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{380}{33 + j19} = \frac{380}{\sqrt{33^2 + 19^2} e^{j \arctg \frac{19}{33}}} = 10 e^{-j30^\circ} = 10 e^{j330^\circ} = 8,6 - j5 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{380e^{j240}}{38 \cdot e^{-j30}} = 10e^{j270^\circ} = -j10 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{380e^{j120}}{38} = 10e^{j120} = -5 + j8,6 \text{ A}.$$

Визначимо лінійні струми:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 8,6 - j5 + 5 - j8,6 = 13,6 - j13,6 \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -j10 - 8,6 + j5 = -8,6 - j5 \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = -5 + j8,6 + j10 = -5 + j18,6 \text{ A}.$$

2.6. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

Задача 2.6.1. Визначити зміну струму у колі (рис. 2.6.1) з послідовно з'єднаними активними опорами та індуктивністю, яке живиться від джерела постійної напруги. Параметри кола такі: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $L = 200 \text{ мГн}$, $U = 90 \text{ В}$. Перехідний процес виникає за рахунок зміни схеми вимикачем S .

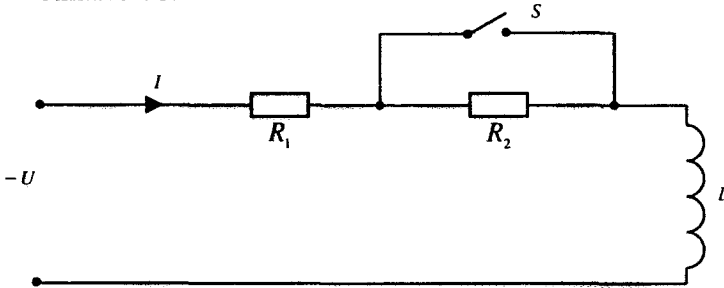


Рис. 2.6.1

Розв'язання.

1. Опір кола до комутації, тобто до моменту включення вимикача S , дорівнював:

$$R = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \text{ Ом},$$

(за постійного струму $X_L = 0$),

а струм:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{90}{30} = 3 \text{ А}.$$

2. У момент початку перехідного процесу струм у колі, тобто після комутації, згідно першого закону комутації буде таким, як і до комутації:

$$i(-0) = i(+0) = I_1,$$

де $i(-0)$ – струм безпосередньо перед комутацією;

$i(+0)$ – струм безпосередньо після комутації.

3. Струм сталого режиму, який буде у колі після закінчення перехідного процесу, так званий примушений струм, буде дорівнювати

$$i_{np} = I_2 = \frac{U}{R_1} = \frac{90}{10} = 9 \text{ А};$$

4. Застосувавши другий закон Кірхгофа для кола у післякомутаційному режимі, матимемо:

$$U = U_{R_1} + U_L = iR_1 - e_L,$$

з цього виразу:

$$i = \frac{U}{R_1} + \frac{e_L}{R_1} -$$

це є струм перехідного процесу, який складається з примушеного або

сталого струму $i_{np.} = \frac{U}{R_1}$ і вільного $i_{eil.} = \frac{e_L}{R_1}$:

$$i_{nep} = i_{np.} + i_{eil.};$$

$$i = \frac{e_L}{R_1} = -\frac{1}{R_1} L \frac{di}{dt} = -\frac{1}{R_1} L \left(\frac{di_{np}}{dt} + \frac{di_{eil}}{dt} \right) = -\frac{L}{R_1} \cdot \frac{di_{eil}}{dt}$$

$$\left(\frac{di_{np.}}{dt} = 0, \text{ оскільки } i_{np.} \text{ величина стала} \right).$$

Із попереднього виразу отримаємо диференційне рівняння:

$$\frac{L}{R_1} \frac{di_{eil}}{dt} + i_{eil} = 0,$$

розв'язком якого буде вираз:

$$i_{eil} = A \cdot e^{-\frac{1}{\tau} t},$$

або, якщо врахувати, що стала кола $\tau = \frac{L}{R_1}$, матимемо:

$$i_{eil} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

де A – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов, тобто це значення струму, яке було у колі при включенні вимикача S , що відповідає моменту комутації ($t = 0$).

$$i = \frac{U}{R_1} + A e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R_1} + A,$$

$$I_1 = I_2 + A,$$

$$A = I_1 - I_2 = 3 - 9 = -6 \text{ А.}$$

Приклади та задачі

Тоді струм перехідного процесу дорівнює:

$$i_{nep} = i_{np.} + i_{sit.} = I_1 + (I_1 - I_2)e^{-\frac{t}{\tau}} = 9 - 6e^{-50t} \text{ A.}$$

$$\tau = \frac{L}{R_1} = \frac{0,2}{10} = 0,02 \text{ c.}$$

5. Задамо ряд значень t (табл. 2.6.1) і будемо графік зміни струму перехідного процесу (рис. 2.6.1.2)

Табл. 2.6.1

$t, \text{ c}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
$I_{np.}, \text{ A}$	9	9	9	9	9	9	9	9
$I_{sit.}, \text{ A}$	-6	-3,6	-2,2	-1,3	-0,8	-0,5	-0,3	-0,18
$i, \text{ A}$	3	5,4	6,8	7,7	8,2	8,5	8,7	8,82

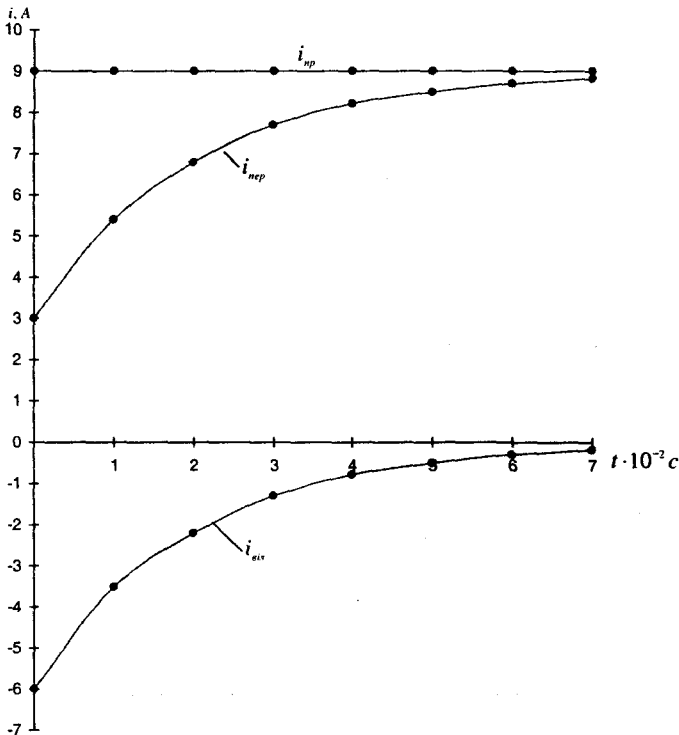


Рис. 2.6.1.2

Задача 2.6.2. Коло (рис. 2.6.2), яке містить послідовно з'єднані опір $R = 50$ Ом та конденсатор $C = 100$ мкФ, вмикається у мережу з напругою 120 В. Визначити закон зміни струму та напруги на конденсаторі при перехідному процесі.

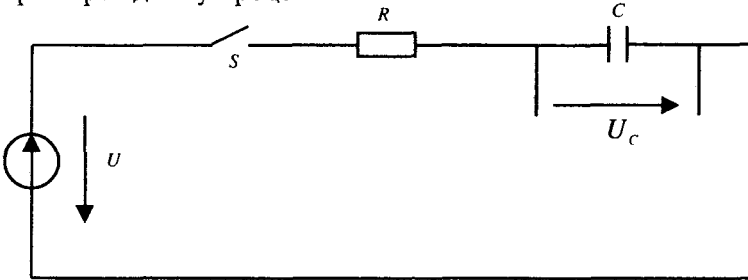


Рис. 2.6.2

Розв'язання:

1. Напруга на конденсаторі при перехідному процесі дорівнюватиме

$$u_C = u_{C_{np}} + u_{C_{виз}},$$

$$u_C = U - Ue^{-\frac{t}{\tau}} = 120(1 - e^{-\frac{t}{0,005}}) \text{ В},$$

стала кола з опором та ємністю дорівнює $\tau = R \cdot C = 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,005$ с.

2. Струм буде змінюватися за виразом:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{U}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = 100 \cdot 10^{-6} \frac{120}{0,005} e^{-\frac{t}{0,005}} = 2,4 \cdot e^{-\frac{t}{0,005}} \text{ А}.$$

Задача 2.6.3. Коло (рис. 2.6.3) містить послідовно з'єднані опори $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 5$ Ом та індуктивність $L = 0,25$ Гн. До замикання вимикача S постійний струм дорівнював $I = 5$ А. Записати закон зміни струму і побудувати графік його зміни за часом після включення вимикача.

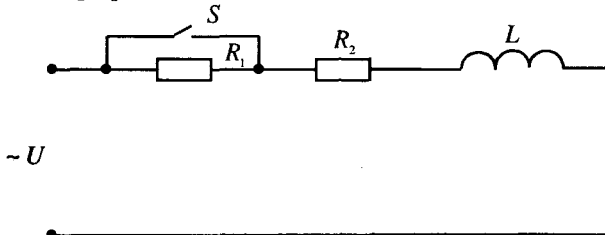


Рис. 2.6.3

Відповідь: $i = 25 - 20e^{-\frac{t}{0,05}} \text{ А}.$

Приклади та задачі

Задача 2.6.4. Котушку, яка має активний опір $R = 10 \text{ Ом}$ та індуктивність $L = 100 \text{ мГн}$, вмикають на постійну напругу 110 В . Через який час струм у котушці досягне 50% свого усталеного значення.

Відповідь: $0,0069 \text{ с}$.

Задача 2.6.5. Коло (рис. 2.6.5) з послідовно з'єднаним опором $R = 50 \text{ Ом}$ і конденсатором $C = 100 \text{ мкФ}$ вмикається на сталу напругу $U = 200 \text{ В}$. Визначити закон зміни струму і напруги на конденсаторі залежно від часу.

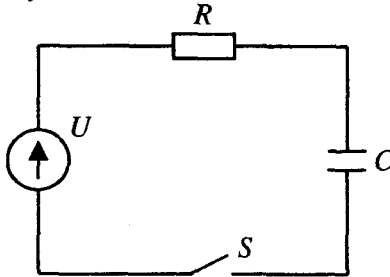


Рис. 2.6.5

Відповідь: $u_c = 200(1 - e^{-\frac{t}{0,005}}) \text{ В}$, $i = 4 \cdot e^{-\frac{t}{0,005}} \text{ А}$.

Задача 2.6.6. Електричне коло (рис. 2.6.6) містить послідовно з'єднані резистор $R_1 = 4 \text{ Ом}$, котушку індуктивності $R_K = 1 \text{ Ом}$, $L_K = 80 \text{ мГн}$ і джерело постійного струму $U = 12 \text{ В}$. Визначити сталу перехідного процесу. Побудувати графік зміни струму і ЕРС котушки за період часу $t = 5 \text{ с}$ з моменту увімкнення вимикача S .

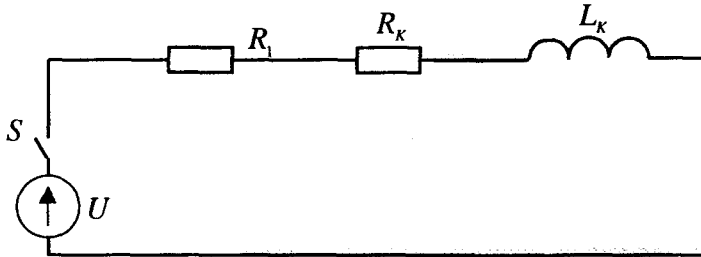


Рис. 2.6.6

Відповідь: $\tau = 0,016 \text{ с}$.

2.7. МАГНІТНІ КОЛА З ПОСТІЙНОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ

Задача 2.7.1. За рахунок протікання струму у котушці, яка має 187 витків, у осерді з листової сталі існує магнітний потік $\Phi = 7,5 \cdot 10^{-4}$ Вб. Товщина осердя 25 мм. Визначити струм у котушці, опори осердя і магнітну проникність. Потокком розсіювання нехтувати.

Розв'язання:

1. Оскільки магнітопровід має скрізь однаковий перетин і виконаний з однакового матеріалу, то у будь-якій точці $S = \text{const}$, і $\mu_a = \text{const}$.
2. Визначаємо площу перетину осердя:

$$S = 0,25 \cdot 0,25 = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

3. Магнітна індукція буде дорівнювати:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{7,5 \cdot 10^{-4}}{6,25 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл.}$$

4. За кривою намагнічування (рис. 2.7.1) визначаємо напруженість поля:

$$H = 1300 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

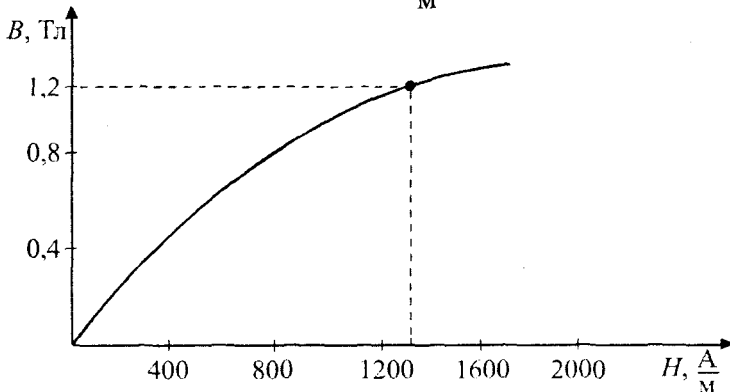


Рис. 2.7.1

5. За законом повного струму визначаємо намагнічуючу силу котушки (Iw):

$$Iw = Hl,$$

$$Iw = 1300 \cdot 0,395 = 513,5 \text{ A.}$$

6. Звідки струм дорівнює:

$$I = \frac{HI}{w} = \frac{513,5}{187} = 2,74 \text{ A.}$$

7. Опір магнітного кола буде дорівнювати:

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{HI}{BS} = \frac{l}{\mu_a S},$$

$$\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{1,2}{13000} = 9,25 \cdot 10^{-4} \frac{\Gamma}{\text{м}}.$$

$$R_m = \frac{l}{\mu_a S} = \frac{0,395}{9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 6,25 \cdot 10^{-4}} = 6,83 \cdot 10^5 \frac{1}{\Gamma}.$$

Задача 2.7.2. По двопровідній лінії (рис. 2.7.2) тече струм $I_1 = I_2 = I = 235 \text{ A}$. Відстань між проводами дорівнює $l = 0,1 \text{ м}$.

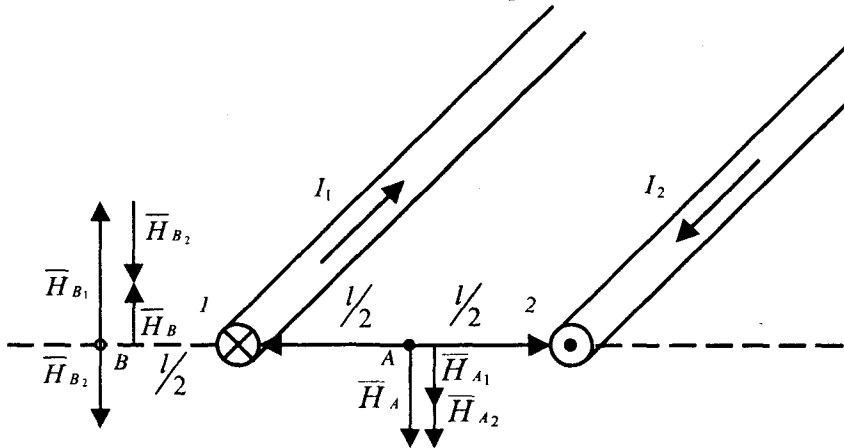


Рис. 2.7.2

Визначити напруженість магнітного поля у точці A , що знаходиться посередині між проводами, і у точці B , що знаходиться на лінії, яка проходить через проводи, на відстані $0,05 \text{ м}$ зліва від проводу 1, а також силу взаємодії між проводами.

Розв'язання:

1. Визначимо напруженість у точці A . Для визначення напруженості скористаємося методом накладання, тобто визначимо окремо напруженості магнітного поля струму I_1 , а потім струму I_2 , а потім результуючу.

Напруженість магнітного поля у точці A , що породжується струмом I_1 , буде дорівнювати:

$$H_{A_1} = \frac{I_1}{2\pi \frac{l}{2}} = \frac{235}{2 \cdot 3,14 \frac{0,1}{2}} = 748 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Так як точка A знаходиться посередині між проводами на лінії, що проходить через їх центри, то $H_{A_2} = H_{A_1} = 748 \text{ А/м}$. У цій точці вектори напруженостей H_{A_1} і H_{A_2} мають однаковий напрям (за правилом правоходового гвинта), тому результуючий вектор напруженості \vec{H}_A дорівнюватиме їх сумі:

$$\vec{H}_A = \vec{H}_{A_1} + \vec{H}_{A_2} = 748 + 748 = 1496 \text{ А/м}.$$

2. Напруженість магнітного поля у точці B , що викликана струмом I_1 , дорівнюватиме H_{A_1} , так як відстань $B - 1$ дорівнюватиме відстані

$1 - A$, тобто $\frac{l}{2} = 0,05 \text{ м}$, тобто $H_{B_1} = H_{A_1} = 748 \frac{\text{А}}{\text{м}}$. Напруженість магнітного поля, що виконується струмом I_2 , дорівнюватиме:

$$H_{B_2} = \frac{I_2}{2\pi(l + \frac{l}{2})} = \frac{235}{2 \cdot 3,14(0,1 + 0,05)} = 249 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Вектором напруженості поля \vec{H}_{B_1} і \vec{H}_{B_2} у точці B мають взаємно протилежні напрями, тому вектор \vec{H}_B дорівнює їх різниці:

$$\vec{H}_B = \vec{H}_{B_1} - \vec{H}_{B_2} = 748 - 249 = 499 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

3. Сила взаємодії визначається за формулою

$$F = \mu_0 \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{235 \cdot 235}{2\pi \cdot 0,1} = 11 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Приклади та задачі

Задача 2.7.3. У однорідне магнітне поле, індукція якого дорівнює $B = 1,4$ Тл, внесена прямокутна рамка площею, $S = 150$ см², перпендикулярно лініям магнітного поля. Визначити магнітний потік, що проходить крізь рамку.

Відповідь: $\Phi = 0,01$ Вб.

Задача 2.7.4. Визначити кількість витків і довжину проводу для намотки циліндричної котушки, якщо довжина котушки $l = 20$ см, а її діаметр $d = 1,6$ см. При струмі в обмотці $I = 3$ А магнітний потік $\Phi = 3 \cdot 10^{-7}$ Вб.

Відповідь: $w = 80$, $l = 4$ м.

Задача 2.7.5. Визначити магнітний потік Φ і магнітну проникність μ сталевого осердя циліндричної котушки, довжиною $l = 80$ см і діаметром 4 см, яка має 200 витків, якщо при струмі $I = 1$ А у центрі циліндричної котушки виникає магнітна індукція $B = 0,68$ Тл.

Відповідь: $\Phi = 8,5 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\mu = 2170$.

Задача 2.7.6. Визначити силу взаємодії двох провідників із струмом, розташованих на відстані $a = 5$ см один від одного у повітрі, по яким проходять струми $I_1 = 30$ А, $I_2 = 75$ А. Провідники мають довжину $l = 200$ мм кожний.

Відповідь: $F = 18 \cdot 10^{-3}$ Н.

Задача 2.7.7. Два паралельних проводи закріплені на ізоляторах, відстань між ними — 1,5 м. По проводах течуть струми $I_1 = I_2 = 150$ А в одному напрямі. Визначити значення і напрям сили, що діє на кожний ізолятор.

Відповідь: $F = 0,135$ Н.

Задача 2.7.8. Енергія магнітного поля циліндричної котушки $W = 3,8$ Дж. Визначити індуктивність котушки і магнітну проникність осердя, якщо $I = 6$ А, кількість витків котушки $w = 150$, довжина її $l = 40$ мм, площа перетину $S = 1$ см².

Відповідь: $L = 0,212$ Гн; $\mu = 3000$.

Задача 2.7.9. Циліндрична котушка без осердя, діаметром $D = 20$ мм і довжиною $l = 100$ мм, по обмотці якої проходить струм $I = 3,5$ А, має 600 витків. Визначити енергію магнітного поля котушки, її індуктивність і магнітний потік.

Відповідь: $L = 1,4 \cdot 10^{-3}$ Гн; $W = 8,6 \cdot 10^{-3}$ Дж; $\Phi = 28,6 \cdot 10^{-3}$ Вб.

Задача 2.7.10. У осерді (рис. 2.7.10) необхідно мати магнітний потік обмотки $\Phi = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Вб, при струмові у обмотці $I = 1,2$ А. Товщина пакету магнітопроводу $b = 2$ см. Визначити необхідну кількість витків, якщо осердя виконано з листової електричної сталі.

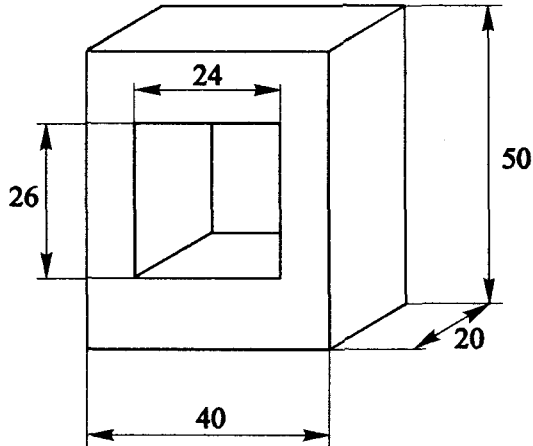


Рис. 2.7.10

Відповідь: $w = 159$ вит.

Задача 2.7.11. На кільце, виконане з електротехнічної сталі із зовнішнім діаметром $D = 42$ мм, внутрішнім $d = 30$ мм, товщиною $b = 8$ мм і має прямокутний переріз, намотано 200 витків. Визначити магнітний потік у кільці при струмові у обмотці $I = 0,5$ А, а також її індуктивність.

Відповідь: $\Phi = 0,57 \cdot 10^{-4}$ Вб; $L = 23$ мГн.

Приклади та задачі

2.8. МАГНІТНІ КОЛА ЗІ ЗМІННОЮ МАГНІТОРУШІЙНОЮ СИЛОЮ

Задача 2.8.1. Котушка з феромагнітним осердям увімкнута під напругу 220 В, діюче значення струму дорівнює 1 А, втрати потужності у котушці, виміряні ватметром, дорівнюють 7 Вт, опір постійному струму складає 5 Ом. Визначити опори еквівалентної схеми котушки (рис. 2.8.1). Потоками розсіювання магнітного поля котушки нехтувати.

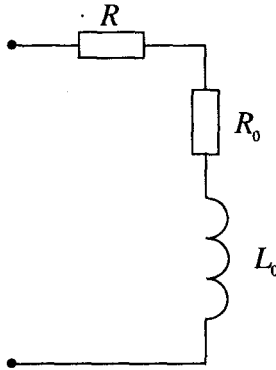


Рис. 2.8.1

Розв'язання:

1. Повний опір схеми заміщення дорівнює:

$$Z = \sqrt{(R + R_0)^2 + X_0^2}.$$

2. Так як відомі діючі значення, то повний опір може бути визначено:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{1} = 220 \text{ Ом.}$$

3. Активні втрати потужності у осерді (у сталі) визначимо за формулою:

$$P_C = P - P_M = P - I^2 R = 7 - 1 \cdot 5 = 2 \text{ Вт.}$$

4. Величина опору R_0 дорівнюватиме:

$$R_0 = \frac{P_C}{I^2} = \frac{2}{1} = 2 \text{ Ом.}$$

5. Реактивний опір котушки буде:

$$X_0 = \sqrt{Z^2 - (R + R_0)^2} = \sqrt{220^2 - (5 + 2)^2} = 219,9 \text{ Ом.}$$

Задача 2.8.2. Для визначення параметрів схеми заміщення котушки (рис. 2.8.1, задача 2.8.1), спочатку її підключили до джерела постійного струму, при цьому струм у колі дорівнював 2 А, напруга 4 В, потужність 8 Вт, а потім до джерела змінного струму, частотою 50 Гц, при цьому величини струму, напруги і потужності відповідно склали: $I = 2 \text{ А}$, $U = 220 \text{ В}$, $P = 60 \text{ Вт}$.

Визначити, чому дорівнюють ці параметри?

Відповідь: $R = 2 \text{ Ом}$, $R_0 = 13 \text{ Ом}$, $X_0 = 52,9 \text{ Ом}$.

2.9. ТРАНСФОРМАТОРИ

Задача 2.9.1. Однофазний трансформатор має 600 витків первинної обмотки і 100 витків вторинної обмотки. Переріз сталевого осердя складає 6 см^2 , максимальна магнітна індукція в ньому $B_m = 0,8 \text{ Тл}$, частота мережі $f = 50 \text{ Гц}$. Визначити ЕРС первинної і вторинної обмоток, а також коефіцієнт трансформації.

Розв'язання:

1. Визначимо максимальний магнітний потік в осерді:

$$\Phi_m = B_m \cdot S = 0,8 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

2. Діючі значення ЕРС первинної і вторинної обмоток будуть мати такі значення:

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi_m f w_1 = 4,44 \cdot 50 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 600 = 63,9 \text{ В.}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi_m f w_2 = 4,44 \cdot 50 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 100 = 10,6 \text{ В.}$$

3. Коефіцієнт трансформації дорівнюватиме:

$$K_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{600}{100} = \frac{63,9}{10,6} = 6.$$

Задача 2.9.2 Трансформатор потужністю 10кВА, підключено до мережі 220 В, напруга на вторинній обмотці при холостому ході дорівнює $U_{2XX} = 130 \text{ В}$. Кількість витків вторинної обмотки $w_2 = 80$. Визначити коефіцієнт трансформації K_T , кількість витків первинної обмотки w_1 , а також струми I_{1H} та I_{2H} .

Розв'язання:

1. Визначаємо коефіцієнт трансформації:

$$K_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{2XX}} = \frac{220}{130} = 1,69.$$

2. Оскільки падіння напруги при холостому ході на первинній обмотці дуже мале, то $U_1 \approx E_1$. Тоді кількість витків первинної обмотки дорівнює:

$$w_1 = K_T \cdot w_2 = 1,69 \cdot 80 = 135 \text{ вит.}$$