

Левченко Т.В., Хоменко В.В.,
Оверчук М.П., Стефанішен М.В.

ЗАГАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА З ОСНОВАМИ АВТОМАТИКИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Рекомендовано Міністерством аграрної політики України
як навчальний посібник для студентів аграрних вищих
навчальних закладів I–II рівнів акредитації із спеціальності
5.10010201 “Експлуатація та ремонт машин і обладнання
агропромислового виробництва”

Київ
“Аграрна освіта”
2010

УДК 621.3

*Гриф надано Міністерством
аграрної політики України (лист
№ 18-94-128/1702 від 04.11.2008 р.)*

- Укладачі: **Левченко Т.В.**, викладач Красноградського технікуму механізації сільського господарства ім. Ф.Я.Тимошенка;
Хоменко В.В., викладач ВП НУБіП України “Немішаївський агротехнічний коледж”;
Оверчук М.П., викладач Тарашанського агротехнічного коледжу імені О.О.Шевченка;
Стефанішен М.В., завідувач відділення Чернятинського коледжу Вінницького НАУ
- Рецензенти: **Терновик Я.В.**, директор Мирогощанського аграрного коледжу;
Комарницький Ю.М., викладач Хотинського технікуму Подільського ДАТУ;
Цяпута В.М., викладач Агротехнічного коледжу Уманського НУС;
Циганкова Н.П., Панченко М.Л., викладачі ВП НУБіП України “Немішаївський агротехнічний коледж”;
Артемова О.Є., викладач Глухівського коледжу Сумського НАУ

Загальна електротехніка з основами автоматики: Навчальний посібник / Т.В.Левченко. – К., 2010. – 358 с.

ISBN 978-966-7906-60-3

Викладено питання із загальної електротехніки та основ автоматики. Широко розкрито теоретичні закономірності за допомогою схем, таблиць, рисунків та формул.

ISBN 978-966-7906-60-3

© Левченко Т.В., Хоменко В.В.
Оверчук М.П., Стефанішен М.В., 2010

ВСТУП

“Загальна електротехніка з основами автоматики” є дисципліною циклу математичної та природничо-наукової підготовки техніків-механіків сільськогосподарського виробництва.

Ця дисципліна 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 основ електротехніки і автоматики є необхідною складовою наукового інтелекту фахівця.

Передбачено вивчення процесів, що проходять в електричних колах постійного і змінного струмів, принципу дії і основних властивостей електричних машин і апаратів, електровимірвальних приладів, напівпровідникових приладів та використання їх у найпростіших аналогових схемах, основ автоматики. Студенти ознайомлюються з системами і елементами автоматики, датчиками і виконавчими елементами, елементами теорії релейних систем автоматики.

Програмний матеріал ґрунтується на знаннях, отриманих під час вивчення фізики, механізації і автоматизації виробничих процесів в тваринництві, сільськогосподарських машин, математики.

Навчальний матеріал є базою для вивчення таких навчальних дисциплін: “Електрообладнання і засоби автоматизації сільськогосподарської техніки”, “Трактори і автомобілі”, “Основи охорони праці” тощо.

З усіх видів енергії наразі найширше використовується електромагнітна енергія. Цей вид енергії в повсякденній практиці прийнято називати електричною енергією. Енергія – це властивість матерії. Для будь-якого виду енергії можна назвати матеріальний об’єкт, який є її носієм. Механічну енергію несуть вода, яка падає на лопаті гідротурбіни, вітер, заведена пружина тощо, теплову – нагрітий газ, пар, гаряча вода та ін.

Носієм електричної енергії є особлива форма матерії – електромагнітне поле. Його основна особливість: здійснення силового впливу на електрично заряджені частинки. Сила залежить від швидкості частин і величини їх заряду.

Ці властивості електромагнітного поля – основа пов’язаних між собою електричних і магнітних явищ (курс фізики – взаємодія електричних тіл, електричного струму, електромагнітної індукції тощо).

Використання цих явищ для отримання, передачі та перетворення електричної енергії і вивчає електротехніка. Використання електромагнітного поля і його енергії для передачі інформації без проводів – завдання радіотехніки.

Електрична енергія широко застосовується в усіх галузях промислового і сільськогосподарського виробництва, на транспорті, в науці, побуті. Її перетворюють в інші види енергії (механічну, теплову, світлову, хімічну) з метою приведення в дію машин та механізмів, отримання тепла і світла, змінювання хімічного складу речовин, виробництва і обробітку матеріалів та ін.

Перетворення електричної енергії в механічну за допомогою електродвигунів дає змогу найвигідніше і економічніше привести в рух різноманітні робочі машини і металорізальні верстати, прокатні стани, підйомально-транспортні механізми, насоси, вентилятори, швацькі та взуттєві машини, молотарки, зерноочисні, борошномельні машини та ін. Електродвигуни використовують на потягах, морських і річкових судах, міському транспорті та ін.

У багатьох технологічних процесах використовують перетворення електричної енергії в теплову і хімічну (електронагрів, електроліз) завдяки чому отримують високоякісну сталь, кольорові метали при найвищій чистоті матеріалів, які виготовляють, а внаслідок електро-термічної обробки – високу якість металів, гумових виробів, пластмас, скла.

Широко застосовується електрозварювання, яке дає високу якість з'єднання металів і забезпечує високі показники продуктивності праці.

Електрохімічні процеси – гальванотехніка дає антикорозійні покриття та ідеальні поверхні для відбиття променів.

В установках штучного освітлення використовують тільки електричні джерела світла (якість світла не поступається сонячному).

Сучасна техніка зв'язку стала можлива тільки завдяки використанню електричної енергії.

Медицина, біологія, астрономія, геологія, математика – в усіх галузях народного господарства застосовуються електротехнології.

Матеріально-технічна база сільського господарства базується на використанні електрообладнання. У сільському господарстві застосовують велику кількість електричних двигунів для привода сільськогосподарських машин і агрегатів; за допомогою автоматизації технологічних процесів значно поліпшується якість роботи,

підвищується продуктивність праці, збільшується вихід кінцевої продукції.

Наразі в сільському господарстві широко застосовуються автоматизовані системи керування і контролю за роботою сільськогосподарських машин та сільськогосподарської техніки.

1. ЗАГАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

1.1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

1. Поняття про електричне поле.
2. Закон Кулона.
3. Напруженість електричного поля, потенціал і напруга.
4. Провідники і діелектрики в електричному полі.
5. Електрична ємність провідників.
6. Конденсатор, його ємність і заряд. З'єднання конденсаторів та їх властивості.
7. Енергія електричного поля.

1. Поняття про електричне поле. Електричне поле – це особливий вид матерії, одна із сторін єдиного електромагнітного поля. Електричне поле знаходиться в просторі, який оточує заряджені частини і тіла, з якими це поле пов'язано.

Головна властивість електричного поля – силовий вплив на електрично заряджену частину, причому сила впливу пропорційна заряду частин і не залежить від її швидкості (рис.1).

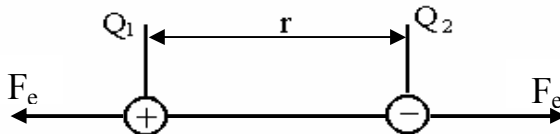


Рис. 1. Пояснення закону Кулона

2. Закон Кулона (1785 р.). Сила взаємодії двох точкових заряджених тіл прямо пропорційна добутку зарядів цих тіл і обернено-пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F_e = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \text{Н}, \quad (1)$$

де F_e – електрична сила, Н;

$Q_1 Q_2$ – електричні заряди, Кл;

r – відстань між зарядженими тілами, м;

ϵ_0 – електрична стала ($\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

3. Напруженість електричного поля, потенціал, напруга.

Силовою характеристикою електричного поля є напруженість електричного поля – векторна величина, чисельно рівна відношенню сили, діючої на позитивно заряджену частину, до її заряду

$$E = \frac{F_e}{Q}, \text{ В/м.} \quad (2)$$

Відношення роботи сил електричного поля по переміщенню зарядженої частини між двома точками до величини заряду частини називається електричною напругою між цими точками.

$$U = \frac{A_{1-2}}{Q}, \text{ В,} \quad (3)$$

де A_{1-2} – робота сил, Дж; Q – електричний заряд, Кл.

Відношення потенціальної енергії зарядженої частини, яка знаходиться в певній точці електричного поля, до величини її заряду виражає потенціал електричного поля в цій точці.

$$\varphi_1 = \frac{A_1}{Q}, \text{ В; } \varphi_2 = \frac{A_2}{Q}, \text{ В.} \quad (4)$$

Напруга є різницею потенціалів:

$$U_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2, \text{ В} \quad (5)$$

Під дією зовнішнього електричного поля в металевому провіднику вільні електрони переміщуються до однієї поверхні (-), а до протилежної поверхні переміщуються дірки (+). При наявності в провіднику вільних носіїв заряду електростатичне поле в ньому відсутнє.

4. Провідники і діелектрики в електричному полі.

Провідникові матеріали мають значну кількість вільних електронів, що збільшують його електропровідність і тому застосовуються як провідники електричного струму.

Провідником називається речовина, основною властивістю якої є електропровідність, тобто властивість створювати під дією незмінного в часі електричного поля незмінний в часі електричний струм. Провідникові матеріали зазвичай використовують у вигляді ізолюваного дроту круглого перерізу. Основним матеріалом для виготовлення електричних проводів і кабелів є стійкі проти корозії мідь і алюміній, які мають гарну електропровідність, пластичність і достатню механічну міцність. Проводи і кабелі в електричних колах застосовують як канали для спрямованої передачі і розподілу електроенергії від джерел до приймачів. Ізолювані проводи

застосовують і для виготовлення обмоток електричних машин, трансформаторів, різних апаратів, реле, вимірювальних приладів тощо.

Для виготовлення нагрівних приладів, реостатів і резисторів широко застосовують електропровідні сплави з відносно великим питомим опором і малим температурним коефіцієнтом опору: константан і нейзільбер, манганин, ніхром, фехраль, хромаль.

Широко застосовуються при виготовленні струмопровідних деталей і контактів в електроапаратах латунь, сплави міді з цинком, різні сплави срібла, золота, олова, свинцю.

Діелектрики – використовують як ізоляційні матеріали. Електричні властивості діелектрика – висока електрична міцність, низька електропровідність, малі діелектричні втрати.

Оскільки в діелектриках число вільних заряджених частин в одиниці об'єму дуже мала, тому при наявності зовнішнього електричного поля з направленим рухом вільних заряджених частин можна не рахуватись і вважати, що в діелектриках переважають явища електростатичні.

Розрізняють діелектрики з полярними і неполярними молекулами.

Електричний диполь – сукупність двох частин з електричними зарядами, рівними за величиною і протилежними за знаком, відстань між якими дуже мала.

Якщо напруженість електричного поля стане більшою за певну критичну величину, то діелектрик втрачає електроізоляційні властивості. Це явище називається пробоем діелектрика, а величину напруги, при якій це явище відбувається – пробивною напругою.

Діелектричні матеріали: газоподібні (повітря, інертні гази, водень, азот, CO₂), рідинні (нафтові електроізоляційні масла, деякі синтетичні рідини, кремній, органічні рідини), тверді (волокнисті – пряжа, тканини, папір, картон з наступним просочуванням спеціальними складовими), шаруваті пластики, пластмаси, електроізоляційні плівки, керамічні матеріали, скло, сегнетоелектрики тощо.

5. Електрична ємність провідників.

Електрична ємність провідника – величина, яка характеризує здатність провідника накопичувати електричний заряд, чисельно рівна відношенню заряду провідника до його потенціалу:

$$C = \frac{Q}{U}, \Phi, \quad (6)$$

де C – ємність;

Q – електричний заряд;

U – напруга.

Електрична ємність між двома провідниками – величина, яка дорівнює відношенню електричного заряду одного провідника до різниці потенціалів між цими провідниками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}, \Phi. \quad (7)$$

6. Конденсатор, його ємність і заряд. З'єднання конденсаторів та їх властивості.

Елемент електричної ланки, призначений для використання його електричної ємності, називається електричним конденсатором.

Конденсатори використовують у схемах коливальних контурів, підсилювачів напруги і потужності, електричних фільтрах. У колах змінного струму використовують конденсатори для компенсації реактивної потужності.

Будова конденсатора: два провідника (обкладинки), розділені діелектриком.

За формою розрізняють плоскі і циліндричні конденсатори.

Ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{E_a \cdot S}{d}, \Phi \quad (8)$$

де d – відстань між обкладками (товщина діелектрика)

S – площа обкладинок, m^2

E_a – абсолютна діелектрична проникність, Φ/m .

Ємність циліндричного конденсатора

$$C = \frac{2\pi \cdot E_a \cdot \ell}{\ell_n \frac{r_2}{r_1}}, \Phi, \quad (9)$$

Де ℓ – довжина циліндричного конденсатора або частини лінії, m ;

ℓ_n – натуральний логарифм;

r_1, r_2 – радіуси обкладинок внутрішньої і зовнішньої, m .

Для двох провідних ліній:

$$C = \frac{\pi \cdot E_a \cdot \ell}{\ell_n \frac{a}{r_0}}, \Phi, \quad (10)$$

де a – відстань між осями проводів ліній, m ;

r_0 – радіус проводу, m .

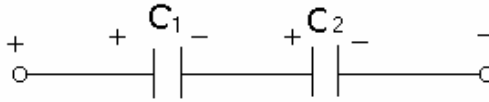


Рис.2 Послідовне з'єднання конденсаторів

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (11)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (12)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (13)$$

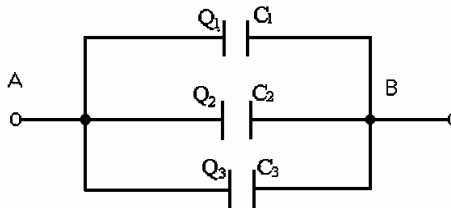
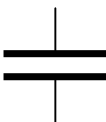


Рис.3. Паралельне з'єднання конденсаторів

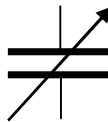
Між обкладинками конденсаторів групи (паралельно з'єднаних) одна і та ж напруга, а заряди різні – пропорційні їх ємностям.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (14)$$

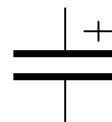
$$U_{AB} = U_1 = U_2 = U_3 \quad (15)$$



Постійної ємності



Змінної ємності



Полярний

Рис.4. Умовні позначення конденсаторів

7. Енергія електричного поля. Електричне поле має енергію, яка накопичується при утворенні заряду в електричних пристроях.

Заряд конденсатора створюється переносом заряджених частинок з однієї обкладинки на іншу під впливом зовнішнього джерела енергії.

Одна частина енергії джерела використовується на створення заряду і накопичується у вигляді енергії електричного поля в конденсаторі, друга частина іде на перетворення в теплову. Величину енергії, зосередженої в зарядженому конденсаторі, можна обчислити за формулою:

$$W_c = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (16)$$

де C – ємність конденсатора, Q

U – напруга зарядженого конденсатора, V

Контрольні запитання

1. Що характеризує напруженість електричного поля?
2. Яка відмінність між пробивною напругою і електричною міцністю діелектрика?
3. Яку властивість провідника характеризує його ємність?
4. Чим визначається робоча напруга батареї конденсаторів при їх паралельному з'єднанні?
5. Порівняйте ємність кабеля і повітряної лінії на 1 км довжини. Яка з них більша і чому?
6. Що таке сульфитація кислотного акумулятора?

1.2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Електричне коло та його елементи.
2. Умовні графічні позначення елементів електричного кола.
3. Електричний струм провідності та його кількісна характеристика.
4. Електричний струм у вакуумі, газах, напівпровідниках.
5. Опір і провідність.
6. Джерела електричної енергії та їх електрорушійна сила (е.р.с.)
7. Одержання електричної енергії з інших видів енергії.
8. Споживачі електричної енергії.
9. Перетворення електричної енергії в інші види енергії.
10. Закон Джоуля-Ленца.
11. Закони Ома.
12. Робота і потужність електричного струму.
13. Баланс потужностей.

14. З'єднувальні проводи. Втрати напруги в лінії електропередач.

15. Режими роботи електричного кола. Способи з'єднання споживачів.


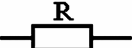
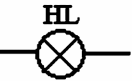

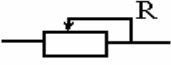
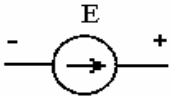


16. Розрахунок електричного кола з одним джерелом енергії.

17. Закони Кірхгофа та їх використання.

18. Робота джерел живлення в режимах генератора і споживача.

1. Електричне коло та його елементи. Електричним колом називається сукупність пристроїв і об'єктів, які створюють шлях для електричного струму. Електричне коло складається з джерела струму, споживачів енергії і з'єднувальних провідників.

2. Умовні графічні позначення елементів електричного кола.

	вимірювальні прилади
	опір
	лампа розжарювання
	люмінесцентна лампа
	змінний резистор
	джерело струму
	контакти комутаційних пристроїв
	електричний двигун

3. Електричний струм провідності та його кількісна характеристика. Струм – фізична величина, яка дорівнює електричному заряду, який переноситься через поперечний переріз провідника в одиницю часу (t).

$$I = \frac{Q}{t}, \text{A.} \quad (17)$$

4. Електричний струм у вакуумі, газах, напівпровідниках. У сучасній техніці широко застосовуються електровакуумні прилади – електронні лампи, вакуумні фотоелементи, у яких забезпечуються умови для виникнення і підтримки електричного струму в середовищі, що не має електропровідності.

Розглянемо двохелектродну лампу (діод). Два металевих електроди, що знаходяться всередині скляного, металевого балона, з якого вилучене повітря, мають виходи назовні, що дозволяє підвести до них електричну напругу. Один електрод з'єднаний з негативним полюсом джерела напруги і називається катодом K . Інший електрод з'єднаний з позитивним полюсом джерела і називається анодом A .

Різниця потенціалів між електродами у вакуумі створює електричне поле, яке необхідно для виникнення і підтримки електричного струму між електродами. Однак цієї умови недостатньо. Електричний струм не може виникнути, якщо всередині балона немає вільних заряджених частинок. Щоб струм виник і підтримувався, необхідно в простір між електродами безупинно вводити вільні заряджені частинки. У електровакуумних приладах для цього використовується фізичний процес виходу вільних електронів з катода – електронна емісія.

Вихід вільних електронів з металу може бути і при нормальній температурі. Але електрони, що відокремилися від металу, не можуть віддалитися більш ніж на три міжатомні відстані, тому що метал, заряджений позитивно, електростатичними силами притягає їх назад. Процеси випускання і поглинання електронів металом відбуваються одночасно, тому біля катода розміщується електронна хмара, яка перешкоджає виходу електронів з металу. Електричне поле між металом і електронною хмарою створює для вільних електронів на границі метал-вакуум потенційний бар'єр з різницею потенціалів U_0 .

Без спеціальних заходів щодо збільшення кінетичної енергії вільних електронів до значення, при якому стає можливим подолання потенційного бар'єра, електронна емісія виявляється настільки слабкою, що практичне використання її неможливе.

Електрон може перебороти потенційний бар'єр і вийти з металу, якщо йому ззовні надати додаткову енергію, рівну роботі, що витрачається на переміщення електрона через поверхневий шар на границі металу з вакуумом. Величина цієї роботи, рівна добутку заряду електрона e_0 і напруги U_0 , називається роботою виходу.

Для вільних електронів метал схематично можна представити у вигляді потенційної шухляди з плоским дном і вертикальними стінками висотою, рівній роботі виходу A_0 .

Одним зі способів збільшення електронної емісії є нагрівання металу. У цьому випадку емісія електронів називається термоелектронною.

В електронній лампі джерелом вільних електронів (емітером) є катод, нагрітий до визначеної температури. Наприклад, робоча температура катода з вольфраму 2250–2550⁰С.

Застосування емітерних матеріалів, що характеризуються меншою роботою виходу, ніж вольфрам (оксиди барію, стронцію), дозволяє значно знизити робочу температуру катода (до 550–1000⁰С).

Електрони, що перейшли з катода у вакуум, під дією електричного поля направляються на анод. За таких умов проміжок між електродами електронної лампи є провідним, а в ланцюзі встановлюється електричний струм I_a , що називається анодним.

Величина анодного струму залежить від різних факторів, найважливішими з яких є температура катода t^0 і напруга між електродами U_a . З ростом напруги струм спочатку повільно, а потім різко зростає, що пояснюється збільшенням швидкості руху електронів до анода.

При деякій значенні U_a і температурі катода t^0 анодний струм досягає струму емісії I_e , коли всі електрони, що залишили катод, досягають анода. Полога ділянка вольт-амперної характеристики називається ділянкою насичення. При збільшенні температури струм емісії зростає, а полого ділянка кривої $I_a(U_a)$ розташовується на графіку вище.

Якщо потенціал катода виявляється вище потенціалу анода ($U_a < 0$), то струм у колі практично дорівнює нулю: електричне поле спрямоване від катода до анода; електрони, що вилетіли з катода, не можуть досягти анода, тому що під дією поля повертаються на катод. Ця “замикаюча” властивість діода використовується для випрямлення змінного струму.

Енергія, необхідна для подолання потенційного бар'єра, може бути надана електронам випромінюванням (видиме світло, ультрафіолетові й інфрачервоні промені та інші випромінювання).

Явище виходу електронів з металу під дією променистої енергії – фотоелектронна емісія (зовнішній фотоэффект) – було виявлено в 1888 р. професором Московського університету А. Столетовим.

Як емітери фотоелектричних катодів використовуються лужноземельні елементи.

Фотокатоди застосовуються в електронних приладах, що реагують на випромінювання – фотоелементах.

Якщо анод має позитивний потенціал щодо катода, то в електричному ланцюзі, що містить фотоелемент із зовнішнім фотоэффектом, встановлюється фотострум, що залежить від ряду факторів, у тому числі від інтенсивності освітлення, від довжини хвилі випромінювання і від напруги між анодом і катодом.

Енергія електронів може бути підвищена бомбардуванням поверхні провідника потоком електронів, які швидко рухаються, названих первинними. Електрони, що залишили провідник у результаті його бомбардування первинними електронами, називаються вторинними, а саме явище виходу електронів одержало назву вторинної електронної емісії.

Вторинна емісія може бути результатом бомбардування провідника не тільки електронами, але і позитивними іонами й іншими частинками. У деяких приладах вторинна емісія – небажане явище, але іноді вона використовується.

Електрони з провідника можуть бути вирвані дією сильного електричного поля (напруженість порядку 10^6 В/см). Така емісія називається автоелектронною чи холодною. У приладах, що працюють за принципом холодної емісії, найбільше поширення має ртутний катод.

Гази є діелектриками, якщо вони знаходяться у звичайних фізичних умовах. У цьому випадку газ складається з нейтральних атомів і молекул, а заряджені частинки (електрони, іони), що є в деякому об'ємі газу лише в незначній кількості, не можуть утворити помітного струму.

Однак з нейтральних молекул і атомів можуть утворитися заряджені частинки – іони, якщо з яких-небудь причин число електронів у них зміниться: цей процес зветься іонізацією. Іонізований газ є провідником. Іонізація відбувається під дією космічних променів,

рентгенівського й ультрафіолетового випромінювання, високої температури, електричного поля.

Досвід показує, що перераховані іонізуючі фактори самі не можуть викликати значного зростання кількості заряджених частин в одиниці об'єму, тим більше, що поряд з іонізацією йде зворотний процес утворення нейтральних молекул і атомів, який називається рекомбінацією. Електропровідність газу, що виникла в результаті зовнішнього іонізуючого впливу, називається *несамостійною*. Якщо зовнішній іонізуючий фактор перестає діяти, то в силу рекомбінації електропровідність газу зникає.

Найбільше значення має іонізація атомів і молекул газу, викликана зіткненням їх з електронами, які швидко рухаються. За такого зіткнення енергія електрона, що рухається, частково чи повністю передається нейтральному атому чи молекулі.

При достатній енергії удару від нейтрального атома молекули відривається один або кілька електронів, замість нейтрального атома молекули з'являються позитивні іони.

Можливо також зчеплення електрона з нейтральним атомом чи молекулою, що призводить до утворення негативного іона. Процес утворення іонів при зіткненні нейтральних атомів і молекул з електронами, які швидко рухаються, називається *ударною іонізацією*. У результаті іонізації кількість електронів збільшується, це приводить до збільшення кількості зіткнень і, отже, до ще більшого збільшення кількості заряджених частин. В іонізованому стані газ є провідником. Електропровідність газу, підтримувана завдяки ударній іонізації дією зовнішнього електричного поля, називається самостійним розрядом.

Розрізняють кілька видів самостійного розряду в газі: тихий, тліючий, іскровий, дуговий.

Тихий розряд виникає при відносно великих тисках газу (наприклад, атмосферному), коли поле в розрядному проміжку між електродами дуже нерівномірне через малий радіус кривизни електродів.

Тихий розряд звичайно спостерігається біля електродів у тих місцях, де напруженість електричного поля досягає деякого значення, яке називається критичним для даного газу, і супроводжується світінням – короною.

При передачі електричної енергії на високій напрузі навколо проводів лінії нерідко можна спостерігати (особливо в сиру погоду) тихий (коронний) розряд, що викликає додаткові втрати енергії.

При низьких тисках (близько 1 мм рт.ст.) у довгій скляній трубці можна отримати **тліючий розряд**, якщо між електродами, розташованими на її кінцях, прикласти напругу в декілька сот вольт.

Різні гази при тліючому розряді дають світіння різного кольору. Завдяки цьому лампи тліючого розряду застосовуються в декоративних цілях.

Залежність струму в лампі тліючого розряду від напруги між електродами (вольт-амперна характеристика) нелінійна, причому в деякому інтервалі зміни струму напруга залишається постійною. Газорозрядні прилади тліючого розряду використовуються для стабілізації напруги.

Іскровий розряд виникає між холодними електродами при великому внутрішньому опорі джерела живлення.

Іонізація газу, що почалася під дією електричного поля, приймає лавиноподібний характер, у результаті чого газовий проміжок стає провідним і між електродами проскакує іскра. При цьому різко зменшується опір газового проміжку.

По відстані між електродами, при якому виникає пробій повітря, можна судити про величину напруги між електродами. На цій підставі для виміру дуже високої напруги застосовуються іскрові розрядники.

Дуговий розряд. При великій потужності джерела живлення іскровий розряд може перейти в дуговий, більш стійкий самостійний розряд у газі при атмосферному чи підвищеному тиску.

Такого роду розряд зветься електричною дугою Петрова, тому що вперше спостерігався в 1803 р. професором В.Петровим. Характерною рисою дугового розряду є те, що він супроводжується сліпучим світінням і сильним нагріванням електродів (до 3000⁰С і більше).

Світлова дія електричної дуги використовується для спеціального освітлення (прожектори, проекційні апарати), а тепла дія – для зварювання і плавлення металів.

Електрична дуга, що виникає при вимиканні електричних установок, – явище небажане, тому що її тепла дія руйнує контакти апаратів, що відключають (рубильники, контактори, вимикачі). Тому вживають спеціальні заходи, у результаті чого апарати, які вимикаються, значно ускладнюються, збільшуються їхні розміри,

Електричний струм при дуговому розряді утворюється електронами й іонами, що звільнилися внаслідок термічної іонізації газу, а також у результаті емісії електронів з розжареного катода. Між електродами під дією зазначених явищ створюється газорозрядна плазма.

Електрони, маючи в тисячі разів меншу масу, ніж іони, в електричному полі здобувають значно більшу швидкість, тому переважають в утворенні струму дуги. При деякому ступені іонізації горіння дуги стабілізується і встановлюється визначене значення струму I_d і напруги між електродами U_d . Зростання струму в дузі приведе до збільшення ступеня іонізації і до зменшення опору дугового проміжку, що спричинить за собою зниження напруги U_d . Таким чином, вольт-амперна характеристика електричної дуги – падаюча крива.

У техніці отримали широке застосування газорозрядні прилади, в яких провідність газового проміжку зумовлена зарядженими частинками, отриманими як за рахунок електронної емісії нагрітого катода, так і іонізацією газів чи пару. До таких приладів належать газотрони, тиратрони, ртутні випрямлячі та ін. Вольт-амперні характеристики газорозрядних приладів нелінійні.

Здатність речовини до утворення в ньому електричного струму, визначається питомою електричною провідністю. За цією ознакою напівпровідники займають проміжне положення між провідниками і діелектриками. Значення питомої провідності напівпровідників знаходяться в широкому інтервалі – від 10^3 до 10^{-10} 1/Ом · см.

Напівпровідниками є багато мінералів, деякі метали, оксиди і сульфіді металів та ін. У періодичній таблиці Менделєєва напівпровідники представлені цілою групою елементів, до яких відносяться германій, кремній, телур та ін.

У напівпровідниках, так само як і в металах, електричний струм утворюється вільними електронами, причому здатність до утворення електричного струму пов'язана з концентрацією вільних електронів і можливістю їхнього спрямованого переміщення в речовині.

Концентрація вільних електронів (кількість електронів в одиниці об'єму) у напівпровіднику в тисячі і мільйони разів менша, ніж у металі. Цим пояснюється кількісне розходження у величинах їх питомої електричної провідності.

Порівняння металів і напівпровідників показує також істотну різницю у впливі температури на їхню провідність. З ростом температури провідність металів зменшується, провідність же напівпровідників зростає.

При збільшенні температури в напівпровіднику, так само як і в металі, зменшується можливість спрямованого руху вільних електронів, що зв'язано зі збільшенням кількості зіткнень. Але на відміну від металів, у напівпровіднику одночасно різко збільшується

концентрація вільних електронів. Ці два фактори впливають на провідність протилежно: із зростанням кількості зіткнень провідність зменшується, а із зростанням концентрації – збільшується. У металах концентрація вільних електронів від температури практично не залежить, тому зміну (зменшення) провідності при зростанні температури пов'язано тільки зі зменшенням можливості спрямованого руху вільних електронів.

У напівпровіднику ж вплив зростання концентрації виявляється сильніше, тому з ростом температури провідність зростає. Така властивість напівпровідників добре пояснюється зонною теорією твердого тіла.

На відміну від металів у напівпровідників валентна зона заповнена до кінця і відділена від зони провідності забороненою зоною шириною близько 1 електрон-вольта (eV).

Для переведення електрона з валентної зони в зону провідності необхідно підвести йому ззовні енергію, більшу, ніж ширина забороненої зони.

Одним з таких видів енергії є тепло. Тепловий рух електронів – процес хаотичний, в силу чого окремі електрони можуть одержати енергію, достатню для переходу в зону провідності. Таким чином, наявність електронів у зоні провідності не виключено при будь-якій температурі вище абсолютного нуля, але кількість їх тим менше, чим нижче температура. Під час підвищення температури буде збільшуватися енергія електронів і все більша кількість їх одержить енергію, що відповідає зоні провідності.

При переході електронів у зону провідності у валентній зоні утворюються вільні енергетичні рівні, наявність яких забезпечує можливість спрямованого руху електронів під дією електричного поля. Вільні енергетичні рівні можуть бути зайняті електронами сусідніх атомів, а на їхнє місце можуть перескакувати наступні електрони і т.д. Отже, деяка кількість електронів, що мають енергію валентної зони, також може брати участь в утворенні електричного струму. Вільні від електронів місця на енергетичних рівнях валентної зони прийнято називати “дірками”.

Переміщення електронів з одного рівня на інший можна представити як переміщення однаково заряджених позитивних дірок у напрямку, протилежному переміщенню електронів.

Таким чином, у напівпровідниках електричний струм може бути утворений вільними електронами (у зоні провідності) і валентними

електронами (у валентній зоні). Провідність першого типу називається електронною (типу n), а провідність другого типу – дірковою (типу p).

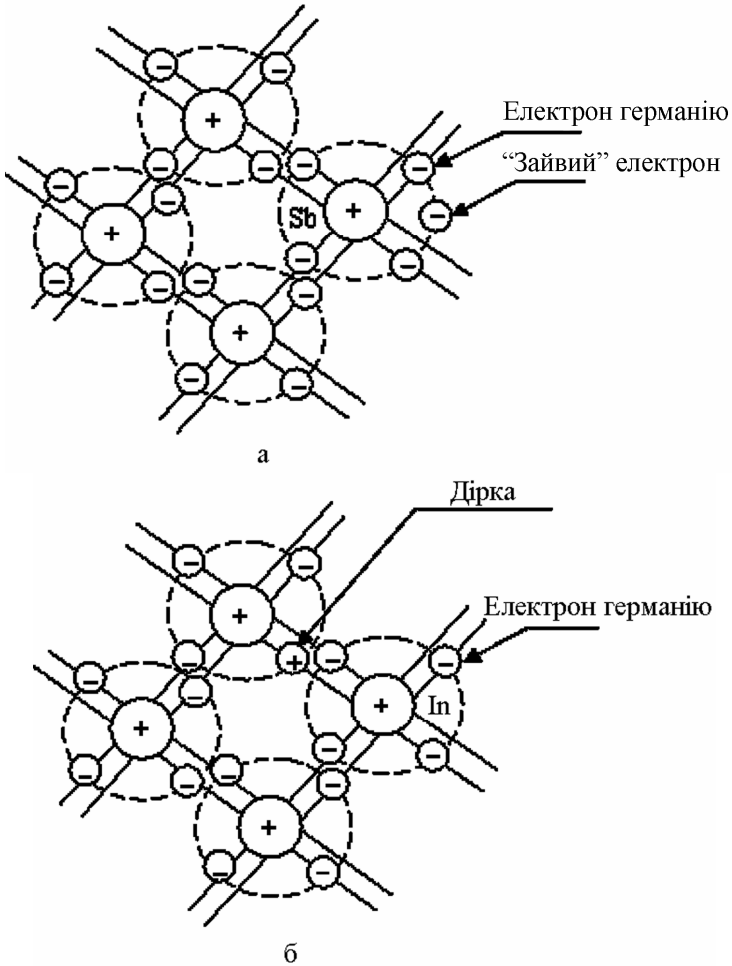


Рис. 5. Структурні схеми кристалів германію:
а – з домішкою сурми; б – з домішкою індію

Значне збільшення провідності чистого напівпровідника можна одержати введенням до нього домішок – атомів інших хімічних елементів, впроваджених у його кристалічну решітку.

Розрізняють два види домішок. До першого виду належать хімічні елементи з більшою валентністю, а до другого – елементи з меншою валентністю, чим валентність напівпровідника.

У першому випадку домішкова провідність виявляється електронною (типу n), у другому випадку – дірковою (типу p). Припустимо, що як основну речовину використовують чотиривалентний германій Ge. Між сусідніми атомами чистого германію є чотирибінний хімічний зв'язок відповідно до кількості валентних електронів.

Атоми введеної домішки – п'ятивалентної сурми Sb – займають місця атомів германію в кристалічних решітках (рис. 5, *a*). При цьому чотири валентних електрони атома сурми утворюють хімічні зв'язки з валентними електронами атомів германію. П'ятий електрон виявляється “зайвим”, менш зв'язаним зі своїм атомом, він легко попадає в зону провідності, тобто стає вільним.

Це підтверджується зонною діаграмою (рис.6), де показані енергетичні зони чистого германію (*a*) і германію з домішками (*б, в*). Енергетичні рівні “зайвих” електронів сурми (2) знаходяться близько до нижньої межі зони провідності (3) і для переходу їх у цю зону потрібна незначна енергія.

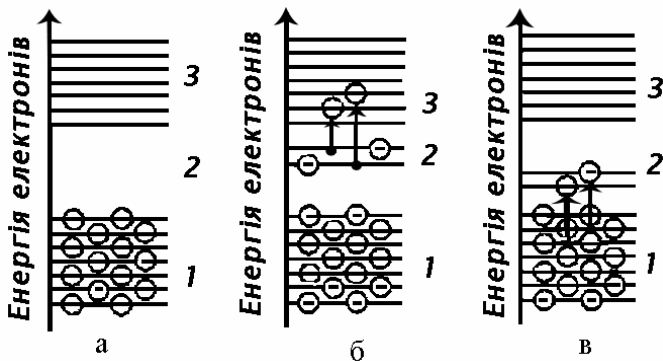


Рис.6. Зонні діаграми германію

Домішковий атом тривалентного індію In також може замінити в кристалічних ґратах атом германію (рис.6, *б*). Але для утворення

чотирибічного зв'язку із сусідніми атомами в атома індію не вистачає одного електрона, тому у валентному зв'язку утвориться вільне місце – дірка.

На зонній діаграмі вільні енергетичні рівні електронів індію (2) відділені від верхньої границі валентної зони (1) незначним інтервалом. При переході електронів валентної зони на ці рівні утворюються нові дірки. Так створюється переміщення дірок у напівпровіднику.

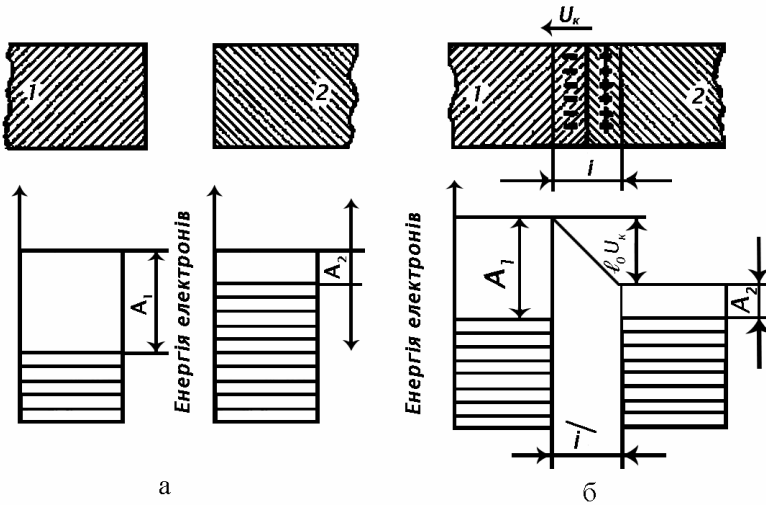


Рис. 7. Визначення контактної різниці потенціалів на зонній діаграмі

Метал 2 має меншу роботу виходу, тобто верхній рівень енергії електронів у нього вищий, ніж у металу 1 (рис. 7, а). Володіючи великою енергією, електрони можуть залишити метал 2. При встановленні контакту починається перехід електронів з металу 2 у метал 1, причому цей процес відбувається за рахунок електронів з більш високим рівнем енергії (рис. 7, б). У результаті енергетичний рівень електронів у металі 2 знижується, а в металі 1 – підвищується; у металі 2 утвориться надлишок позитивного заряду, а в металі 1 – надлишок негативного заряду. Вирівнювання енергетичних рівнів, що відбувається на межі металів супроводжується виникненням контактної різниці потенціалів U_k у прикордонному шарі.

Явище електричного струму провідності має величезне практичне значення. З ним зв'язані найважливіші енергетичні перетворення одержання електричної енергії з хімічної, механічної, теплової й

інших видів енергії і зворотне перетворення електричної енергії в інші види енергії; передача електричної енергії на відстань.

Зазначені енергетичні перетворення здійснюються в електричних колах – сукупність пристроїв, призначених для утворення електричного струму.

Найпростіше електричне коло (рис.8) складається з трьох основних елементів: джерела електричної енергії, приймача електричної енергії, сполучних провідів.

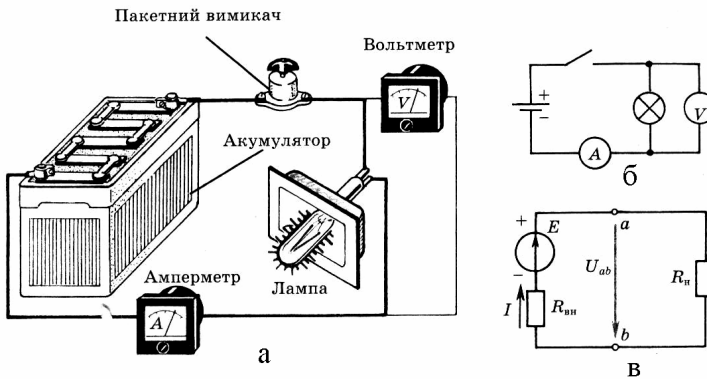


Рис.8. Схема найпростішого електричного кола:

а – монтажна схема; б – принципіальна схема; в – схема заміщення

Фізичні процеси одержання електричної енергії протікають залежно від виду перетвореної енергії. Загальним для всіх цих процесів є те, що при перетворенні будь-якого виду енергії в електричну в джерелі утвориться електрорушійна сила (е.р.с.).

Дотепер ми говорили про дію на заряджені частинки сил електричного поля. Однак вплив на них можуть зробити й інші сили, не пов'язані з електричним полем. Такі сили, названі сторонніми, виникають під час деяких хімічних реакцій, як це має місце в гальванічних елементах і акумуляторах; під час нагрівання місця спаю двох різнорідних металів чи напівпровідників (термопари); під час висвітлення деяких типів фотоелементів; під час руху заряджених часток у магнітному полі (зокрема, під час руху провідника).

5. Опір і провідність. Електричний опір – величина, яка характеризує властивість ділянки електричного кола і визначається

відношенням напруги на цій ділянці до струму в ньому при відсутності на ділянці е.р.с.

$$R = \frac{U}{I} \cdot \text{Ом} \quad (18)$$

Опір залежить від матеріалу провідника і його розмірів

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \text{ Ом}, \quad (19)$$

де ρ – питомий опір матеріалу, Ом·мм²/м.

Величина, зворотна опору, називається провідністю.

$$q = \frac{1}{R}, \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См} \quad (20)$$

Провідність провідника довжиною 1 метр, який має площу поперечного перерізу 1 м², називається питомою провідністю

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \frac{\text{См}}{\text{м}} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} \quad (21)$$

У діелектриках:

$$\text{об'ємний опір } R_v = \frac{U}{I_v} = \rho_v \frac{\ell}{S}, \text{ Ом} \quad (22)$$

$$\text{поверхневий опір } R_s = \frac{U}{I_s} = \rho_s \frac{\ell}{d}, \text{ Ом} \quad (23)$$

де I_v, I_s – об'ємний і поверхневий струм, А

ρ_s, ρ_v – питомий поверхневий і об'ємний опір, Ом·мм²/м

ℓ, d – довжина і ширина поверхні діелектрика (довжина вимірюється за напрямом, перпендикулярним до нього), м.

Питомий опір провідника залежить від температури

$$R = R_0(1 + \alpha T), \text{ Ом} \quad (24)$$

За дуже низьких температурах (майже -273°C) опір деяких матеріалів та сплавів різко падає і стає практично рівним нулю – це надпровідність.

Резистори – це елементи електричного кола, призначені для використання їх електричного опору для обмеження і регулювання струму в електричних колах за рахунок введення в них постійного або змінного за величиною додаткового опору.

За наявності електричного струму в провідниках рухомі вільні електрони, зіштовхуючись з іонами кристалічної решітки, зазнають протидії своєму руху. Ця протидія кількісно оцінюється опором кола.

За законом Ома для ділянки кола $I = \frac{U}{R}$, звідки $R = \frac{U}{I}$, Ом. Залежно

від геометрії і властивостей матеріалу провідника: $R = \frac{\rho \ell}{S}$, Ом;

$$\text{питомий опір } \rho = \frac{R \cdot S}{\ell}, \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м}. \quad (25)$$

Величина, обернена опорю, називається електричною провідністю

Елементи електричного кола, які характеризуються опором R , називаються резистивними. Вони можуть бути дротовими і недротовими. Дротові резистори і реостати виготовляють з матеріалів з великим питомим опором. При цьому забезпечується необхідний опір за відносно малих габаритів. Резистори використовують для обмеження і регулювання струму.

Реостат забезпечує отримання змінного опорю, значення якого регулюється зміною положення рухомого контакту реостату. У недротових резисторах і реостатах електропровідна частина – це провідна плівка нанесена на каркас.

З підвищенням температури провідника збільшується амплітуда коливального руху іонів у вузлах кристалічних решіток. Це призводить до збільшення числа зіткнень вільних електронів з іонами, а значить, до зменшення середньої швидкості направлено руху електронів і питомої електричної провідності, що відповідає збільшенню опорю провідника.

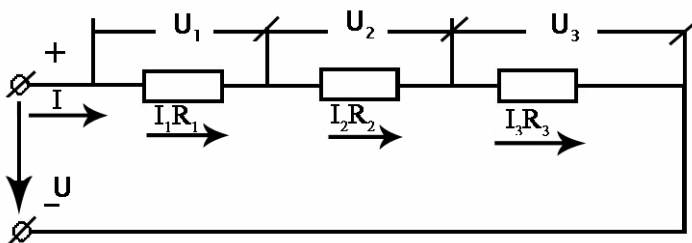


Рис.9. Послідовне з'єднання резисторів

За наявності джерела струму через всі резистори проходить один і той же струм

$$I_1 = I_2 = I_3 = I. \quad (26)$$

Енергія, яка надходить у коло, дорівнює сумі енергій, які витрачаються на всіх ділянках кола

$$UIt = U_1It + U_2It + U_3It, \quad (27)$$

де U – напруга, прикладена до всього кола, В;

U_1, U_2, U_3 – напруга на ділянках, В.

Скоротивши на It , маємо:

$U=U_1+U_2+U_3$ (28) – напруга, прикладена до кола, дорівнює сумі напруг на її окремих ділянках:

$$R=R_1+R_2+R_3, \text{ Ом.} \quad (29)$$

Загальний опір кола дорівнює сумі опорів усіх послідовно з'єднаних елементів кола. Потужність, споживана на кожній ділянці кола пропорційна їх опорам:

$$P_1 : P_2 : P_3 = R_1 : R_2 : R_3; \quad (30)$$

$$P=P_1+P_2+P_3, \text{ Вт;} \quad (31)$$

$$P=UI = \frac{U^2}{R} = I^2R, \text{ Вт.} \quad (32)$$

Якщо опори під'єднані до однієї і тієї ж пари вузлів електричного кола, тобто знаходяться під дією однієї і тієї ж напруги, $U_1=U_2=U_3=U$ (33) то напруга на паралельно з'єднаних резисторах однакова.

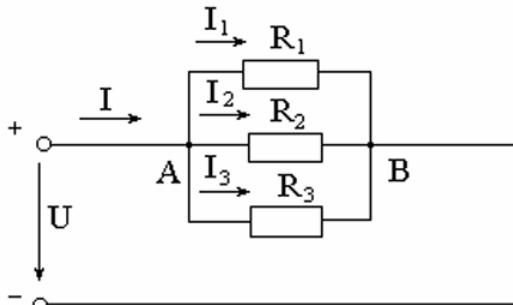


Рис.10. Паралельне з'єднання резисторів

За законом Ома струм на кожному опорі

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3} \quad (34)$$

Струми в паралельно з'єднаних резисторах обернено пропорційні їх опорам або прямо пропорційні провідності,

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} = G_1 : G_2 : G_3 \quad (35)$$

Струм в нерозгалуженій ділянці кола дорівнює сумі струмів в паралельно з'єднаних резисторах

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (36)$$

Загальний опір паралельно з'єднаних резисторів:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \text{ Ом} - \text{ для двох паралельно з'єднаних опорів} \quad (37)$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} - \text{ для трьох опорів} \quad (38)$$

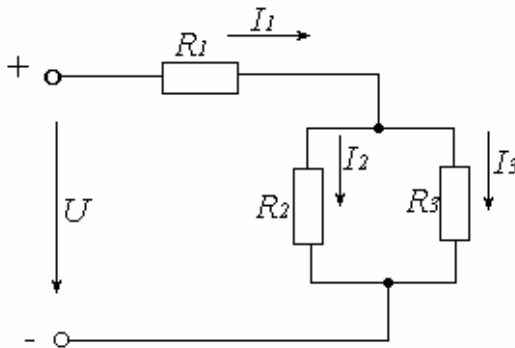


Рис.11. Змішане з'єднання резисторів

Розрахунок струмів в усіх резисторах і напруги на них, якщо відомі напруга живлення і опори всіх резисторів на схемі.

Порядок розрахунку:

1. Визначають еквівалентні опори ділянок кола, складених із паралельно і послідовно ввімкнених резисторів, знаходять загальний опір кола.
2. Визначають струм в нерозгалуженій ділянці.

3. Визначають напругу на послідовно з'єднаних ділянках схеми і струми в паралельних розгалуженнях.

Опір ділянки кола, складеної паралельно з'єднаними резисторами R_2 і R_3 :

$$R_{2-3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}. \quad (39)$$

Загальний опір кола $R = R_1 + R_{2-3}$. (40)

Струм в нерозгалуженій частині

$$I = I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_{2-3}}. \quad (41)$$

Напруга на резисторах:

$$U_1 = IR, \quad U_{2,3} = IR_{2,3} \quad (42)$$

Струми в розгалуженнях:

$$I_2 = \frac{U_{2-3}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{2-3}}{R_3} \quad (43)$$

6. Джерела електричної енергії та їх електрорушійна сила (е.р.с.). Для вимірювання великих струмів у потужних електротехнічних установках використовують такі одиниці струму: 1 кА=1000 А, у радіотехніці 1мА=0,001 А, 1мкА=0,000001 А.

Електричний струм – це спрямований рух вільних носіїв електричного заряду в речовині або в вакуумі діями зовнішніх неелектричних сил.

Відношення струму до площі поперечного перерізу провідника, по якому протікає цей струм, називають густиною струму

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ – в системі СІ – } \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \quad (44)$$

Оскільки в електротехніці площа перерізу визначається в мм²,

$$\text{то } \delta = \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad (45)$$

Джерела струму – пристрої, в яких відбувається перетворення різних видів енергії (механічної, хімічної, теплової) в електричну:

➤ електромашинні генератори – перетворюють механічну енергію в електричну;

➤ гальванічні елементи (принцип дії базується на тому, що на межі між металом, розміщеним у розчині електроліту і самим розчином створюється різниця потенціалів, яка підтримується за рахунок

роботи хімічних сил). Найбільш широко використовують марганцево-цинкові елементи;

➤ акумулятори (принцип дії базується на тому, що два однакових металевих електроди, розміщених в електроліті, після проходження крізь них струму поляризуються і самі можуть певний час бути джерелом струму – властивість накопичувати електричну енергію;

➤ термоелектрогенератори – відбувається перетворення теплової енергії в електричну. Дія базується на термоелектричному ефекті;

➤ сонячні батареї – перетворюють енергію сонячного світла в електричну. Використовується явище вентильного фотоелектру – явище створення різниці потенціалів під час освітлення деяких напівпровідникових матеріалів.

Величина роботи, яку витрачено на переміщення одиниці додатного заряду від від'ємного затискача джерела до додатного, називається електрорушійною силою джерела.

7. Одержання електричної енергії з інших видів енергії.

Перетворення хімічної енергії в електричну пов'язано з явищем електролітичної дисоціації, сутність якого – утворення заряджених часток – іонів при розчиненні деяких речовин (кислот, солей та ін.).

На рис.12 показана цинкова пластинка, опущена у водяний розчин сірчаної кислоти (електроліт). Цинк розчиняється в електроліті, причому в розчин переходять позитивні іони Zn^{2+} . Розчин заряджається позитивно, а цинк – негативно. Розчинення цинку обумовлене хімічними силами.

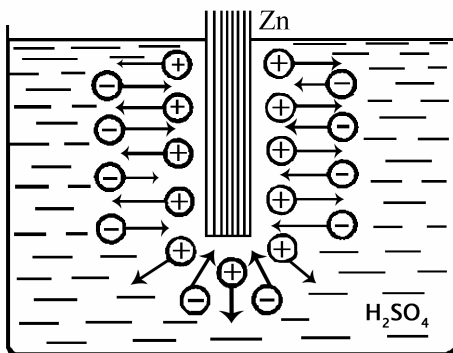


Рис.12. Цинкова пластинка в розчині сірчаної кислоти

У місці контакту цинк – розчин з'являється електричне поле іонів, що утворилися, спрямоване від розчину до цинку.

По мірі розчинення цинку росте заряд, а разом з ним і напруженість електричного поля. Електричне поле протидіє переходу іонів Zn^{+} у розчин, тому на визначеній стадії розчинення цинку припиняється.

Такий врівноважений стан відповідає рівності двох сил, що діють на іони Zn^{+} : хімічної, під дією якої цинк розчиняється, і електричного, перешкоджаючому розчиненню. Розчинення цинку припиняється за наявності деякої різниці потенціалів між цинком і розчином.

Якщо в той же розчин помістити пластинку з іншої речовини, то описаний процес буде мати місце й у цьому випадку. Але отримана різниця потенціалів φ_2 може бути іншої величини – більше або менше φ_1 .

За таким принципом утворюється е.р.с. гальванічного елемента й акумулятора (рис.13).

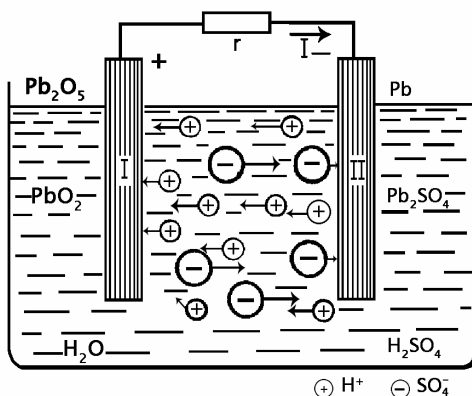


Рис.13. Режим розрядки свинцевого акумулятора

У цьому випадку е.р.с. створюється і підтримується під час роботи елемента хімічними силами (сторонні сили). Отже, відбувається перетворення хімічної енергії в електричну.

Електричний струм у гальванічному елементі супроводжується незворотними електрохімічними процесами, які можна описати визначеними хімічними реакціями.

Застосування гальванічних елементів обмежене – в одиницю часу вони можуть дати лише незначну кількість електричної енергії, а термін їхньої роботи невеликий і закінчується, коли активна речовина електродів деякою мірою буде витрачена.

Значно більше застосування мають акумулятори, електрохімічні процеси яких зворотні. Зворотність електрохімічних процесів дозволяє проводити багаторазову зарядку і розрядку акумуляторів. Під час заряджання в них накопичується визначена кількість хімічної енергії за рахунок витраченої електричної енергії, а при розрядці ця енергія може бути використана в електричному ланцюзі у вигляді електричної енергії.

Безпосереднє перетворення теплової енергії в електричну можна здійснити, використовуючи явища в контакті двох металів чи напівпровідників, де діють сторонні сили, якими обумовлена дифузія заряджених часток.

Величина контактної різниці потенціалів залежить не тільки від властивостей контактуючих матеріалів, але і від температури контакту, тому що з температурою пов'язана енергія вільних електронів і їхня концентрація.

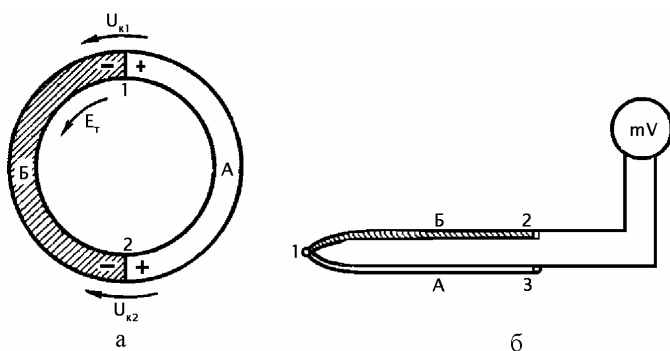


Рис.14. Утворення термо-е.р.с. металевої термонари

Розглядаючи замкнуте коло із двох різних металів (рис.14, а), переконуємося, що при однаковій температурі контактів 1 і 2 електричні струми в ланцюзі не проходять, тому що контактні різниці потенціалів обох контактів однакові, але спрямовані в протилежні сторони по колу.

Якщо один з контактів, наприклад 2, нагріти ($t_1 > t_2$), то рівновага порушиться – у контакті 1 з’явиться додатковий стрибок потенціалу, зв’язаний з нагріванням. У цьому випадку $U_{к1} > U_{к2}$, у колі утвориться термо-е.р.с., абсолютне значення якої пропорційне різниці температур контактів.

$$E_T = U_{к1} - U_{к2} = E_0(t_1 - t_2) \quad (46)$$

де E_0 – величина, що залежить від властивостей металів, які утворюють контакт.

Таким чином, термо-е.р.с. виникає в колі, що складається з різних металів, при різній температурі місць з’єднання.

Термо-е.р.с. у розглянутому колі підтримується завдяки нагріванню спаю, тобто при постійній витраті теплової енергії, але термо-е.р.с. є причиною електричного струму.

Однак концентрація вільних електронів у металах велика і при переході з одного металу в інший змінюється дуже мало. У зв’язку з цим контактна різниця потенціалів виявляється незначною і мало залежить від температури. З цієї причини металеві термоелементи мають дуже малі е.р.с. (у спаї платини і заліза – 1,9 мВ при різниці температур гарячого–холодного спаїв 100°C , а к.к.д. їх не перевищує 0,5%. Такі термоелементи застосовують для вимірювання температур (термопари).

Для цього в коло термопари включається вимірювач термо-е.р.с. – мілівольметр (рис.14,6). Термопара є джерелом електричної енергії, а вимірювальний прилад – приймачем.

Крім контакту 1 основних металів термопари між собою утворюються контакти їх зі сполучними проводами (2, 3). У цих контактах теж є контактні різниці потенціалів, але вони не змінюють термо-е.р.с., якщо їхня температура підтримується однаковою.

За наявності довільного числа контактів різних металів сума контактних різниць потенціалів у замкнутому ланцюзі залишається рівною нулю, якщо всі контакти мають однакову температуру. Незалежно від числа контактів, термо-е.р.с. пропорційна різниці температур більш нагрітого контакту і всіх інших контактів, що знаходяться при однаковій температурі.

На відміну від металів у напівпровідниках під час збільшення температури значно збільшуються концентрації вільних електронів і дірок. Завдяки цій властивості напівпровідників одержують вищі термо-е.р.с. (до 1 мВ на 1°C різниці температур) і к.к.д. термоелементів до 7%.

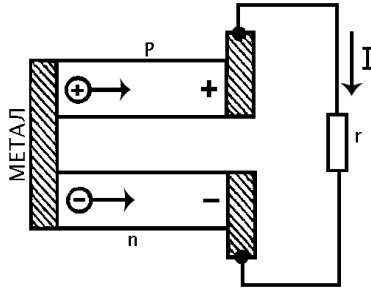


Рис.15. Напівпровідниковий термоелемент

Напівпровідниковий термоелемент складається з двох напівпровідників (n і p, рис.15). Один з них має електронну, інший – діркову електропровідність, під час нагрівання напівпровідників у місці з'єднання їх металевою пластинкою значно збільшується концентрація вільних носіїв заряду. Тому в напівпровідниках виникає дифузія їх від гарячого кінця до холодного. У напівпровіднику з електронною електропровідністю до холодного кінця переміщуються електрони, в результаті чого цей кінець заряджається негативно. В іншому напівпровіднику до холодного кінця переміщуються дірки, утворюючи позитивний заряд. Виникаюча різниця потенціалів протидіє дифузії і при деякому значенні її встановлюється рівновага сил електричного поля і сторонніх сил, під дією яких іде процес дифузії носіїв заряду. Ця різниця потенціалів і є термо-е.р.с. напівпровідникового термоелемента.

Якщо до холодних кінців напівпровідників підключити струмопровідний елемент, наприклад резистор, то утвориться замкнутий ланцюг і електричний струм у ньому.

Концентрація і енергія вільних носіїв заряду в напівпровідниках може збільшуватися не тільки під час нагрівання, але і під дією променевої енергії (світло, інфрачервоне випромінювання). Провідність напівпровідників, обумовлена дією на них променевої енергії, називається фотопровідністю (внутрішнім фотоефектом). На явищі фотопровідності базується дія групи електронних приладів, названих фотоопорами. У вентильному фотоелементі здійснюється контакт двох напівпровідників, один із яких має електронну електропровідність, а інший – діркову.

8. Споживачі електричної енергії. Приймачами електричної енергії можуть бути різні пристрої, в яких електрична енергія перетворюється в інші види: механічну, теплову, світлову та ін. Це – електродвигуни, електронагрівальні прилади, освітлювальні лампи і інші пристрої. Їх називають електричним навантаженням або споживачами.

9. Перетворення електричної енергії в інші види енергії. Електричну енергію перетворюють на механічну, теплову, світлову, для чого застосовують установки з електроприводом, нагрівні елементи та джерела світла як видимого так і невидимого (ультрафіолетового).

10. Закон Джоуля-Ленца. Струм проходячи по провіднику, нагріває його. Виділення тепла пов'язане з переміщенням зарядів, тобто з роботою електричних сил.

Енергія, яка виділяється, перетворюється і нагріває провідник, розраховується за формулою

$$A = UIt, \text{ Дж} \quad (47)$$

Закон Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2Rt, \text{ Дж} \quad (48)$$

де t – час проходження струму, с.

Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику, пропорційна квадрату струму, опору ділянки і часу проходження струму.

11. Закони Ома.

Закон Ома для ділянки кола – залежність між струмом у провіднику і різницею потенціалів на кінцях провідника.

Струм на ділянці кола прямо пропорційний напрузі цієї ділянки і обернено пропорційний його опору.

$$I = \frac{U}{R}, \text{ А} \quad (49)$$

$$\text{звідки } U = IR, \text{ В; } R = \frac{U}{I}, \text{ Ом.} \quad (50, 51)$$

Закон Ома для повного кола – залежність між струмом у колі, е.р.с. і опором. Для кола з одним джерелом, (із балансу потужностей) визначаємо:

$$EI = I^2R + I^2r_0 \quad \text{і} \quad E = I(R + r_0), \text{ В} \quad (52, 53)$$

де r_0 – внутрішній опір джерела, Ом.

$$\text{Звідки } I = \frac{E}{R + r_0}, \text{ А} \quad (54)$$

Струм прямопропорційний електрорушійній силі джерела і обернено пропорційний сумарному опору кола.

Якщо в колі декілька послідовно з'єднаних джерел струму, то струм у такому колі дорівнює відношенню алгебраїчної суми електрорушійних сил джерела до суми всіх зовнішніх і внутрішніх опорів кола.

Порядок розрахунку кіл постійного струму.

Довільно обирають додатній напрямок струму в колі, позначають його стрілкою. Потім визначають алгебраїчну суму електрорушійних сил, причому електрорушійні сили вважаються додатними, якщо їх напрямок співпадає з обраним додатнім напрямком струму і від'ємними – якщо не співпадають. Якщо в результаті розрахунку отримуємо додатне значення, то дійсний напрямок струму співпадає з напрямком електрорушійної сили.

12. Робота і потужність електричного струму. Оскільки напруга на ділянці кола постійного струму фізично – робота сил електричного поля на переміщення електричного заряду за час t на ділянці кола з опором R , то здійснюється робота

$$W = UQ = UI t = U^2 t / R = RI^2 t, \text{ Дж.}$$

Швидкість перетворення електроенергії в інші види енергії на ділянці кола при постійному струмі рівна роботі за одиницю часу і характеризується потужністю.

$$P = W/t \text{ або } P = UI = U^2 / R = RI^2, \text{ Вт}$$

13. Баланс потужностей. Умови балансу енергії:

$$A_{\text{дж}} = \sum_{k=1}^n A_k, \text{ Дж,} \quad (55)$$

де A_k – енергія, яка виділяється на кожному із n ділянок кола. Потужність, яка розвивається джерелом електричної енергії.

$$P_{\text{дж}} = \frac{A_{\text{дж}}}{t} = EI, \text{ Вт.} \quad (56)$$

Потужність споживання енергії в зовнішньому колі

$$P_{\text{зовн}} = \frac{A_{\text{зовн}}}{t} = UI, \text{ Вт.} \quad (57)$$

$$\text{Баланс потужностей } P_{\text{дж}} = \sum_{k=1}^n P_k. \quad (58)$$

Потужність джерела дорівнює сумі потужностей споживання енергії на всіх ділянках електричного кола.

14. Втрати напруги в лініях електропередач.

Під час передачі електроенергії по проводах великої довжини необхідно враховувати їх опір, на якому відбуваються помітні втрати напруги:

$$\Delta U = IR_{\text{л}} = I \frac{2\rho\ell}{S}, \text{ В.} \quad (59)$$

При заданій напрузі U_1 на вході лінії напруга на навантаженні при номінальному струмі навантаження:

$$U_2 = U_1 - \Delta U. \quad (60)$$

Падіння напруги ΔU не повинно перевищувати певних значень. Так, для освітлювального навантаження значення ΔU не повинно перевищувати 2% від номінальної напруги. Необхідна площа поперечного перерізу проводу становить:

$$S = \frac{2I\rho\ell}{\Delta U}. \quad (61)$$

Цей вираз не є універсальним, тому навантаження лінії задається у вигляді спожитої потужності, а абсолютне значення втрат напруги замінюється відносним:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_2} \times 100\%. \quad (62)$$

Використання $\Delta U\%$ замість ΔU доцільне, оскільки створюється умова універсального підходу до оцінки ліній електропередачі незалежно від напруги, при якій передається енергія.

Підставляючи в формулу (61) замість ΔU значення, отримане з (62) отримаємо:

$$S = \frac{2I\rho\ell}{\Delta U\% \cdot U_2} \times 100\%. \quad (63)$$

Помноживши чисельник і знаменник правої частини на U_2 , знайдемо:

$$S = \frac{2P_2\rho\ell}{\Delta U\% \cdot U_2^2} \times 100\%. \quad (63a)$$

В процесі передачі енергії частина її втрачається в проводах. Потужність втрат

$$\Delta P = I^2 R_{\text{л}} = \Delta UI. \quad (63\text{б})$$

Коефіцієнт корисної дії лінії електропередач:

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{U_1 I - \Delta UI}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (63\text{в})$$

15. Режими роботи електричних кіл. Способи з'єднання споживачів. Режим роботи електричного кола визначається значенням струмів, напруг і потужностей його окремих елементів. Джерела і приймачі електричної енергії проводу, а також допоміжна апаратура і прилади характеризуються номінальними величинами струму, напруги, потужності та ін., на які ці прилади розраховані заводами-виробниками. Номінальні величини зазвичай наводяться в паспорті на приладі.

Режим роботи, при якому дійсні струми, напруги, потужності елементів електричного кола відповідають їх номінальним значенням, називається **номінальним (нормальним)**. Режими електричного кола через різні причини можуть відрізнитися від номінального. Якщо в електричному колі дійсні характеристики режиму відрізняються від номінальних величин її елементів, але відхилення знаходяться в допустимих межах, то режим називається **робочим**.

Режим електричного кола або окремих джерел, за якого струм в них дорівнює нулю називається режимом **холостого ходу**. При холостому ході напруга на зовнішніх затискачах джерела дорівнює його е.р.с.

Режим електричного кола, при якому коротко замкнено ділянку з одним або декількома елементами, називається **режимом короткого замикання**. Коротке замикання в електричних установках небажані, оскільки струм короткого замикання в декілька разів перевищує номінальний, що призводить до різкого збільшення виділення тепла струмопровідних частинах.

Пасивні елементи в електричних колах з'єднуються послідовно і паралельно. В багатьох схемах можна виділити групи з трьох елементів, які утворюють трикутник або зірку опорів.

16. Розрахунок електричного кола з одним джерелом енергії. Для розрахунку електричного кола з одним джерелом енергії найчастіше застосовують метод еквівалентних опорів.

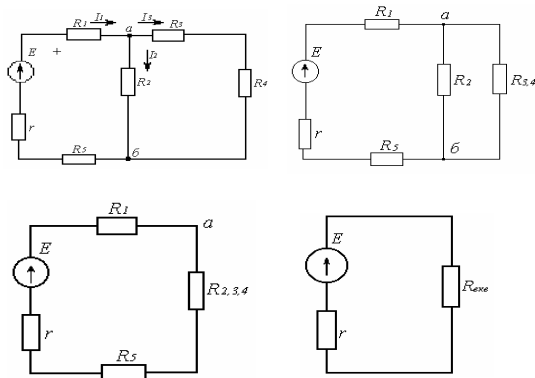


Рис.16. Еквівалентні перетворення електричних схем

Після такої заміни отримуємо простішу схему. Розрахунок схеми зводиться до визначення еквівалентного опору.

17. Закони Кірхгофа та їх використання. Перший Закон Кірхгофа (стосується вузлів електричних кіл і показує баланс струмів в них).

Алгебраїчна сума струмів, які сходяться у вузлі, дорівнює нулю.

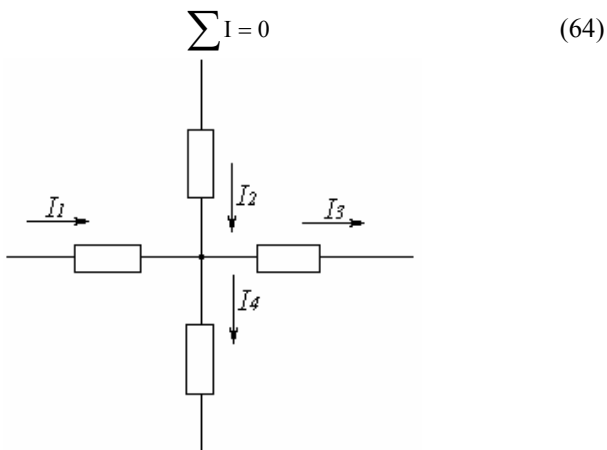


Рис.17. До пояснення першого закону Кірхгофа

Струми, спрямовані до вузла – додатні, а ті, що виходять з вузла – від’ємні.

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0. \quad (65)$$

Другий Закон Кірхгофа (стосується будь-яких замкнених контурів, які можна виділити в розгалуженому електричному колі і висловлює баланс напруги в них).

Алгебраїчна сума е.р.с. в будь-якому контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі падіння напруги на опорах цього контуру:

$$\sum E = \sum IR. \quad (66)$$

Для складання таких рівнянь необхідно:

1. Довільно задатися напрямком струмів і позначити їх стрілками.
2. Вибрати напрямок обходу контуру (зазвичай за годинниковою стрілкою).
3. Скласти рівняння, причому додатнім приймають ті струми і е.р.с., напрямок яких співпадає з напрямком обходу контуру, а від’ємний напрямок – протилежний до напрямку обходу.

Для розв’язання задач аналізу розгалужених електричних кіл за допомогою законів Кірхгофа необхідно скласти рівняння електричного стану тієї чи іншої розрахункової схеми кола в такій послідовності: вибрати довільно позитивні напрями струмів у всіх розгалуженнях схеми електричного кола; скласти рівняння для вузлів за допомогою першого закону Кірхгофа; скласти рівняння для контурів за допомогою другого закону Кірхгофа.

18. Робота джерел живлення в режимах генератора і споживача. Хімічні джерела енергії можуть працювати в режимах генератора і споживача. Якщо незаряджений акумулятор під’єднати до джерела струму через опір, то він буде заряджатися протягом певного часу, тобто буде працювати в режимі споживача.

Після повної зарядки акумулятор може працювати в режимі генератора, віддаючи свою енергію споживачам, тобто працюватиме в режимі генератора.

Контрольні запитання

1. Що називається електричним колом?
2. Дайте визначення електричного струму.
3. Які формули для визначення кількісної характеристики струму?
4. Наведіть приклади джерел електричного струму.
5. Накресліть схему електричного кола і поясніть призначення її окремих елементів.
6. Що таке електрорушійна сила?
7. Назвіть способи з'єднання споживачів електричної енергії.
8. Як визначають втрати напруги в лініях електропередач?
9. Як розрахувати розгалужене електричне коло за допомогою законів Кірхгофа?
10. Запишіть закон Джоуля-Ленца.
11. Що таке потужність електричного струму?
12. Назвіть одиниці фізичних величин: заряду, напруженості, потенціалу, напруги, сили струму, електрорушійної сили, опору провідника, енергії, потужності.

1.3. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1. Магнітне поле та його характеристики.
2. Феромагнітні речовини і їх намагнічування.
3. Магнітні кола.
4. Елементи магнітних кіл електричних машин, трансформаторів, електричних апаратів.
5. Закон електромагнітної індукції.
6. Перетворення механічної енергії в електричну.
7. Перетворення, електричної енергії в механічну.
8. Самоіндукція. Індуктивність соленоїда.
9. Взаєміндукція.
10. Енергія магнітного поля.
11. Вихрові струми.

1. Магнітне поле та його характеристика. Навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле. За класичною теорією електромагнетизму, джерелами магнітного поля є електричні макро- та мікро-струми. Термін “магнітне поле” запроваджено Фарадеєм. Згодом класичну теорію магнітного поля побудував Максвелл, а в XX сторіччі з'явилась квантова теорія магнітного поля.

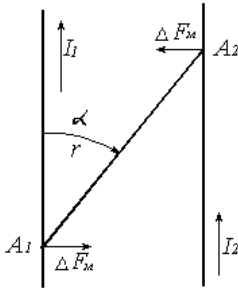


Рис.18. До пояснення закону Ампера

Величина, чисельно рівна добутку струму провідності вздовж лінійного провідника і безкінечно малого відрізка цього провідника, – називається елементом струму:

$$A = I \Delta l, \text{ Ам.} \quad (67)$$

Закон Ампера (1820 р.): сила взаємодії двох елементів струму прямопропорційна добутку цих елементів струму і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

$$\Delta F_M = \frac{\mu_0 A_1 A_2 \sin \alpha}{4\pi r^2}, \text{ Н} \quad (68)$$

де ΔF_M – елементарна магнітна сила, Н;
 A_1, A_2 – елементи лінійних струмів I_1, I_2 , Ам;
 r – відстань між елементами струму, м;
 α – кут між напрямками, м;

$$\mu_0 - \text{магнітна стала, } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (69)$$

Електричний струм збуджує магнітне поле. Ця здатність струму характеризується магніторушійною силою (МРС). Ця сила називається ще намагнічуючою, або повним струмом. Магніторушійна сила чисельного дорівнює силі струму.

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

$$\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \sum I = F. \quad (70)$$

Додатними вважають струми, якщо напрям магнітного поля збігається з напрямом обходу контуру. Напрямок магнітного поля визначається за правилом свердлика.

Котушка індуктивності, що вмикається на джерело постійного струму, має МРС

$$F = WI, \quad (71)$$

де W – число витків;

I – сила струму в котушці.

Магнітна індукція – векторна величина, чисельно рівна відношенню сили, діючої на заряджену частину, до добутку заряду Q і швидкості V частини, якщо напрямок швидкості такий, що ця сила максимальна.

$$B = \frac{F_M}{Q \cdot V}, \text{ Тл}, \quad (72)$$

Магнітна індукція в центрі кільцевого витка проводу зі струмом:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}, \text{ Тл}, \quad (73)$$

де r – радіус кільцевого витка.

Магнітна індукція поля проводу зі струмом у точці, розміщеній на відстані a від проводу

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}, \text{ Тл}. \quad (74)$$

Магнітна індукція кільцевої котушки, радіус якої r :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2\pi r}, \text{ Тл} \quad (75)$$

де N – кількість витків.

Магнітна індукція циліндричної котуши довжиною ℓ :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{\ell}, \text{ Тл} \quad (76)$$

Магнітний потік, що пронизує площадку площею S м², розміщеною перпендикулярно до силових ліній магнітного поля ($\alpha=0$).

$$\Phi = BS, \text{ Вб} \quad (77)$$

та під кутом $\alpha \neq 0$ $\Phi = BS \cos \alpha, \text{ Вб} \quad (78)$

Одиницею магнітного потоку СІ є вебер (Вб).

Намагнічувальна сила: $F = IN, \text{ А}. \quad (79)$

Напрямок намагнічувальної сили пов'язаний з напрямком струму у витках котушки. Його можна визначити за правилом свердлика.

Якщо ручку правоїдного свердлика обернути за напрямком струму у витках, то поступальний рух свердлика покаже напрямок намагнічувальної сили котушки зі струмом.

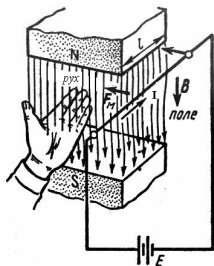


Рис.19. Електромагнітна сила $F_{\text{в}}$ що діє на провідник зі струмом в магнітному полі

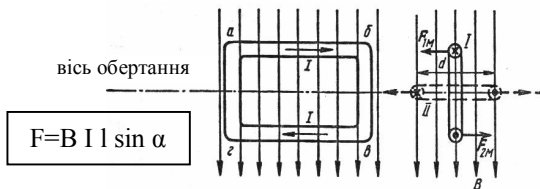


Рис.20.Провідний контур у магнітному полі

$$\text{Потокозчеплення } \psi = \Phi N, \text{ Вб.} \quad (80)$$

$$\text{Власна індуктивність } L = \frac{\psi}{I}, \text{ Гн.} \quad (81)$$

Величина власної індуктивності дорівнює відношенню потокозчеплення самоіндукції елемента електричного кола до струму в ньому.

Для циліндричної або кільцевої котушки

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell}, \text{ Гн.} \quad (82)$$

Для відрізка двопровідної лінії

$$L = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \ln \frac{a}{r_0}, \text{ Гн.} \quad (83)$$

де a – відстань між проводами лінії;

r_0 – радіус поперечного перерізу дроту, м.

Взаємна індуктивність двох індуктивних котушок – величина, яка дорівнює відношенню потокозчеплення взаємної індуктивності однієї котушки до струму в іншій котушці, яким обумовлено це потокозчеплення.

Взаємоіндуктивність виражається через індуктивності котушок

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \text{ Гн} \quad (84)$$

де k – коефіцієнт магнітного зв'язку, $k < 1$.

2. Феромагнітні речовини і намагнічування. Здатність намагнічуватись і підсилювати зовнішнє магнітне поле – одна з властивостей феромагнітних матеріалів.

Групи феромагнітних матеріалів:

- магніто-м'які (характеризуються великими величинами початкової і максимальної магнітної проникності);

- ✓ низько вуглецеві сталі, чавун, листові електротехнічні сталі з підвищеним вмістом кремнію (з цих матеріалів виготовляють магнітопроводи трансформаторів, електричних машин і апаратів);

- ✓ залізонікелеві сплави – пермалої (з них виготовляють магнітні підсилювачі, високочастотні вузли радіоелектронної апаратури);

- ✓ сплави на основі заліза і алюмінію – альсифери (з цих матеріалів виготовляють осердя).

- магніто-тверді матеріали (характеризуються великими залишковою індукцією та втратами на гістерезис);

- ✓ хромовольфрамкові, хромомольбденові сталі, сплав алніко та ін. (їх використовують для виготовлення постійних магнітів).

3, 4. Магнітні кола. Елементи магнітних кіл електричних машин, трансформаторів електричних апаратів. Магнітні кола необхідні для формування робочого магнітного потоку в електричних машинах, трансформаторах, електровимірювальних приладах.

Частина магнітного пристрою (яка включає феромагнітні тіла), в якій при наявності намагнічувальної сили виникає і вздовж якої замикається магнітний потік, називається магнітним колом. Частину магнітного кола, по якій замикається магнітний потік, виготовляють в основному з феромагнітних матеріалів і називають магнітопроводом.

Магнітні кола бувають розгалужені і нерозгалужені. Однорідні магнітні кола – магнітопровід виконано з одного матеріалу і має однаковий за формою і розміром поперечний переріз.

Конструкція магнітопроводів різноманітна і визначається їх призначенням. Всі вони мають намагнічувальну обмотку і рухоми частину.

Рухома частина магнітопроводу (якір) намагнічується в магнітному полі обмотки зі струмом і притягується до нерухоми частини з силою

$$F_m = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \text{Н}, \quad (85)$$

де B – магнітна індукція;

S – площа перерізу полюса.

Магнітний потік досягає максимального значення для цієї електромагнітної системи, оскільки повітряний зазор між осердям і якорем скорочується, а магнітний опір стає найменшим.

Аналогічно діють електромагніти з рухомим осердям в середині котушки зі струмом. Це електромагнітні вимірювальні механізми.

При виникненні електромагнітного струму в провідному контурі одна частина енергії джерела живлення іде на подолання електричного опору контура і перетворюється в тепло, інша накопичується у вигляді енергії магнітного поля.

5. Закон електромагнітної індукції. В провіднику, який рухається перпендикулярно до ліній магнітної індукції, індуктується електрорушійна сила E електромагнітної індукції, яка пропорційна магнітній індукції поля B , довжині провідника ℓ і швидкості його руху V .

$$E = BV\ell, \text{ В} \quad (86)$$

Напрямок наведеної е.р.с. визначається за правилом свердлика.

Перетворення механічної енергії в електричну відбувається на гідроелектростанціях. Перетворення електричної енергії в механічну використовується в електроприводах металорізальних верстатів, кормоприготувальних машин, транспортерів та ін.

6. Самоіндукція. Індуктивність Індуктивність соленоїда. Усяка зміна струму в індуктивній котушці відповідно викликає зміну її потокозчеплення. У результаті відповідно до закону електромагнітної індукції виникає е.р.с. самоіндукції:

$$e_L = -d\psi/dt = -\omega d\Phi/dt. \quad (87)$$

При постійному струмі явище самоіндукції відсутнє. У колах постійного струму воно епізодичне і виникає тільки в момент включення чи відключення кола, а також при змінах струму і зміні навантаження, тоді як у колах змінного струму діє безупинно відповідно до періодичної і закономірної зміни струму. В електричних колах самоіндукція відіграє роль електромагнітної інерції подібно до сил інерції в механічних системах.

В індуктивній котушці (якщо не брати до уваги поле розсіювання) струм, що змінюється, створює магнітний потік

$$\Phi = \omega \mu_a Si / \ell.$$

Підставивши в рівняння (87) значення диференціала як функції струму

$$d\Phi = \omega \mu_a S di / \ell, \text{ отримаємо } e_L = -\frac{\mu_a \omega^2 S}{\ell} \frac{di}{dt} \text{ або } e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (88)$$

Таким чином, е.р.с. самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни струму в колі.

$$\text{У формулі } L = -\frac{\mu_a \omega^2 S}{\ell} = \frac{\omega^2}{R_M} \quad (89) \quad \text{індуктивність є } \textit{власною}$$

індуктивністю елемента електричного кола.

Індуктивність характеризує властивість індуктивної котушки як елемента електричного кола перетворювати електроенергію джерела в енергію магнітного поля.

Отже, власна індуктивність котушки прямо пропорційна квадрату числа її витків і обернено пропорційна магнітному опору осердя, що визначається його магнітною проникністю і геометричними розмірами котушки, але не залежить від струму. Відносно короткі проводи мають невелику індуктивність L ; у біфілярних котушок, намотаних подвійним проводом із протилежними струмами, магнітні потоки яких взаємно знищуються, вона практично дорівнює нулю ($e = 0$).

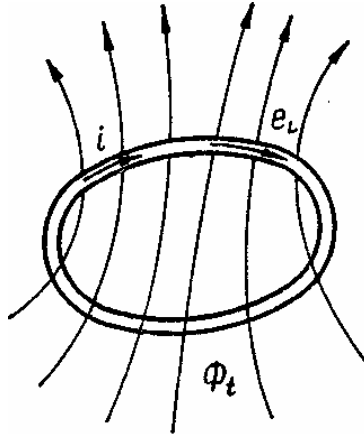


Рис.21. Умовно-позитивний напрямок е.р.с. самоіндукції

Умовно-позитивний напрямок е.р.с. самоіндукції в замкнутому контурі збігається з умовно-позитивним напрямком струму в ньому,

тому що умовно-позитивний напрямок кожної е.р.с., індукованої змінним магнітним потоком зв'язано з його умовно-позитивним напрямком за правилом свердлика (рис.21). Відповідно до цього правила дійсний напрямок е.р.с. самоіндукції $e = -Ldi/dt$ збігається з напрямком, зазначеним на рисунку стрілкою, лише при зменшенні струму в ланцюзі ($di/dt < 0$, а $e > 0$).

Зв'язок між індуктивністю L і потокозчеплення Ψ будь-якого елемента електричного ланцюга, за визначенням, має таку формулу $L = \Psi/i$.

Власна індуктивність – величина, рівна відношенню потокозчеплення самоіндукції елемента електричного кола до струму в ньому. Для котушки, усі витки якої зчеплені з однаковим потоком, наприклад, для котушки з феромагнітним осердям, якщо зневажити потоками розсіювання, $L = \omega\Phi/i$. (90)

7. Взаємоіндукція. Величина, що характеризує здатність двох індуктивно зв'язаних контурів створювати е.р.с. взаємоіндукції в одному з них під час зміни струму в іншому, називається взаємною індуктивністю цих контурів і позначається літерою M .

Якщо взаємоіндукції подібне до явища самоіндукції, тільки е.р.с. при цьому виникає не у власному провіднику, а в сусідньому.

$$M = K\sqrt{L_1L_2} \quad (91)$$

K – коефіцієнт зв'язку (він завжди менше 1).

8. Енергія магнітного поля. При вмиканні котушки індуктивності на постійну напругу U струм у колі збільшується від нуля до сталого значення $I=U/r$. Збільшення струму в колі супроводжується наростанням у навколишньому середовищі магнітного поля, в якому запасується визначена кількість енергії, отриманої від джерела живлення. Ця енергія використовується, наприклад, під час короткого замикання котушки, забезпечуючи проходження струму доти, доки не буде цілком перетворена в тепло (в опорі кола).

За другим законом Кірхгофа

$$U = ri + Ldi/dt. \quad (92)$$

Помноживши обидві частини цього рівняння на добуток idt , отримаємо

$$Uidt = ri^2dt + Lidi, \text{ або } Uidt = ri^2dt + id\Psi,$$

тому що добуток Ldi дорівнює елементарному збільшенню $d\Psi$ потокозчеплення.

Ліва частина останнього рівняння $Uidt$ – це енергія, отримана колом від джерела живлення за час dt . Перший доданок правої частини $i^2 dt$ – це енергія, перетворена за час dt у тепло в опорі r (нагрівання). Другий доданок правої частини рівняння $i d\Psi = Lidi$ – це збільшення енергії магнітного поля, викликане збільшенням струму на di і зв'язаного з ним збільшення потокозчеплення $d\Psi$.

Підсумовуючи збільшення енергії під час збільшення струму від нуля до значення I , одержимо енергію, накопичену в магнітному полі ланцюга

$$W = \int_0^I Lidi = LI^2/2 = \Psi I/2 \quad (93)$$

Якщо магнітне поле збуджується струмом I , що проходить по кільцевій котушці (магнітна індукція B має однакове значення в будь-якій точці магнітопроводу котушки), то її потокозчеплення

$$\Psi = \Phi \omega = BS\omega. \quad (94)$$

Якщо напруженість поля котушки $H = I\omega/\ell$, то струм у котушці

$$I = H \ell / \omega \quad (95)$$

Підставивши у формулу (93) написані вирази для потокозчеплення і струму, отримаємо вираз енергії магнітного поля кільцевої котушки

$$W = \frac{\Psi I}{2} = \frac{BS\omega H \ell}{2\omega} = \frac{BH}{2} S \ell \quad (96)$$

З огляду на те, що добуток $S\ell$ дорівнює об'єму V магнітопроводу, знаходимо

$$W = \frac{BH}{2} V = \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0} V \quad (97, a)$$

Магнітна енергія, віднесена до одиниця об'єму або щільність енергії магнітного поля

$$W_V = \frac{W}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0} \quad (97, б)$$

Ця формула застосовується як для однорідного, так і для неоднорідного магнітного поля.

9. Вихрові струми. Змінний струм, що проходить по котушці, створює в магнітопроводі змінний магнітний потік. Останній наводить в осерді е. р. с., під дією яких виникають вихрові струми, що замикаються по симетричних контурах (рис. 22). Ці вихрові струми нагрівають сталеве осердя, тобто втрачається активна потужність. Крім цього, вихрові струми, які мають напрямок, протилежний напрямку струму в котушці, розмагнічують внутрішню частину осердя.

Для зменшення цих негативних явищ осердя складають з окремих ізольованих одна від одної пластин (рис. 23). При цьому опір проходженню вихрових струмів різко зростає і тому вони стають незначними. У цілому втрати активної потужності на вихрові струми прямо пропорційні квадрату струму, товщині окремих листів електротехнічної сталі та магнітній індукції:

$$P_v = \gamma_{mv} I_a^2, \quad (98)$$

де γ_{mv} – еквівалентний активний опір, за допомогою якого враховуються витрати активної потужності на вихрові струми;
 P_v – витрати активної потужності на вихрові струми.

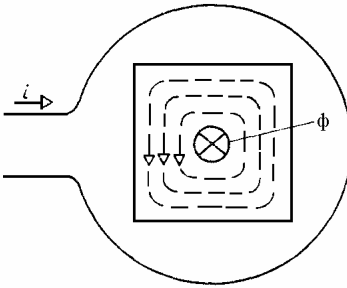


Рис. 22. Вихрові струми

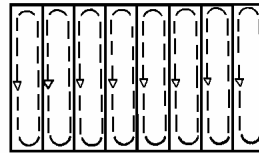


Рис. 23. Будова осердя

В цілому втрати активної потужності в електротехнічній сталі (далі в сталі)

$$P_c = P_r + P_v = (\gamma_{mr} + \gamma_{me}) I_a^2 = \gamma_m I_a^2,$$

де γ_m – еквівалентний активний опір, який враховує втрати активної потужності в сталі;

P_r – втрати активної потужності на гістерезис в сталі осердя.

Контрольні запитання

1. Що таке магнітна індукція і що вона характеризує?
2. Чим відрізняється магнітна індукція від напруженості магнітного поля?
3. У чому суть явища електромагнітної індукції?
4. У чому полягає правило Ленца?
5. Поясніть причину виникнення вихрових струмів у сталених осердях електричних машин і трансформаторів. Який вплив цих струмів?
6. У чому суть намагнічування феромагнітних матеріалів?

1.4. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЗМІННИЙ СТРУМ

1. Змінний струм.
2. Галузі застосування та переваги синусоїдального струму промислової частоти.
3. Принцип дії найпростішого генератора змінного струму.
4. Основні параметри, які характеризують синусоїдальні функції: миттєве, амплітудне, діюче значення струму, е.р.с., напруги, початкова фаза, зсув по фазі.
5. Зображення синусоїдальних величин часовими і векторними діаграмами.

1. Змінний струм. Змінний струм – це струм, який змінюється з часом. Синусоїдальний електричний струм – періодичний електричний струм, який є синусоїдальною функцією часу.

2. Галузі застосування і переваги синусоїдального струму промислової частоти. Заводи, сільськогосподарські підприємства працюють на синусоїдальному струмі. Причини застосування синусоїдального струму:

➤ Після винаходу трансформатора було вирішено завдання підвищення напруги при передачі електричної енергії на великі відстані і після зниження напруги і розподіл їх між споживачами.

➤ Електродвигуни змінного струму простіші за конструкцією, надійніші двигунів постійного струму, що забезпечило їм широке використання.

3. Принцип дії найпростішого однофазного генератора змінного струму. Генератори синусоїдальної електрорушійної сили, як правило, мають дві основні частини: індуктор і якір.

Індуктор створює магнітне поле, а в якорі наводиться е.р.с. У промислових генераторах якір нерухомий і розміщується в станині. Він має одну або декілька (частіше три) обмоток. Індуктор – це електромагніт, тобто магніт з явно або неявно вираженими полюсами з обмоткою збудження, яка живиться постійним струмом. Індуктор розміщується на валу генератора і живлення від нього підводиться за допомогою кілець через графітові щітки.

Принцип отримання синусоїдальної е.р.с. За допомогою магнітів створюється магнітне поле. Між магнітами розміщено рамку з провідником. Якщо рамку обертати відносно її вісі, то спостерігатиметься явище електромагнітної індукції і в ній наводиться е.р.с.

Магнітний потік, який проходить крізь рамку, залежить від положення рамки в магнітному полі, тобто від кута α :

$$\Phi = BS \cos \alpha = \Phi_m \cos \alpha, \quad (99)$$

де S – площа рамки, мм^2 ;

α – кут між напрямком магнітного поля і нормаллю до площини рамки (градус);

Φ_m – максимальне (амплітудне) значення потоку, Вб.

Кут α при обертання рамки змінюється: $\alpha = \omega t$,

ω – кутова швидкість обертання рамки, радіус (градус),

t – поточний час, с.

Магнітний потік, який проходить крізь рамку, змінюється з часом

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t. \quad (100)$$

Знайдемо е.р.с., яка наводиться в рамці

$$e = E_m \sin \omega t. \quad (101)$$

Е.р.с., яка наводиться в рамці, змінюється з часом за синусоїдальним законом.

4. Основні характеристики синусоїдальної функції: миттєве, амплітудне, діюче значення струму, е.р.с., напруги, початковий фаза, зсув фаз, період, частота. Частота обертання ротора

$$f = \frac{1}{T} = \frac{pn}{60}, \text{ Гц} \quad (102)$$

де T – період, с;
 p – число пар полюсів;
 n – швидкість обертання, с^{-1} .

$$\text{Період } T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ с} \quad (103)$$

де ω – кутова швидкість, рад/с (швидкість зміни фази струму).

$$\text{Якщо } f=50 \text{ Гц} \quad \omega = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.} \quad (104)$$

Фазовий кут – відповідає періоду і дорівнює 2π .

Діючий струм – середнє квадратичне значення електричного струму за період і у $\sqrt{2}$ разів менше за амплітудне значення.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (105)$$

$$\text{Діюче значення е.р.с. } E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (106)$$

Середнє значення змінного струму: середнє арифметичне із всіх миттєвих значень струму за період

$$I_{\text{сер}} = \frac{2I_m}{\pi}, \text{ А.} \quad (107)$$

$$\text{Миттєві значення струму, е.р.с., напруги } i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (108)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \quad (109)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (110)$$

Фаза – аргумент синусоїдального струму, який відраховується від точки переходу струму через нуль до додатного значення.

Початкова фаза (ψ) – значення фази синусоїдального струму в початковий момент часу.

Про синусоїдальні величини, які мають різні за значенням початкові фази говорять, що вони зсунуті по фазі. Зсув фаз – алгебраїчна величина, яка визначається різницею початкових фаз двох синусоїдальних функцій:

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2, \text{ або } \varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (111)$$

Миттєві значення струму, напруги:

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi_i) = 1,41I \sin(\omega t + \varphi_i); \quad (112)$$

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_u) = 1,41U \sin(\omega t + \varphi_u). \quad (113)$$

5. Зображення синусоїдальних величин часовими діаграмами, векторними і комплексними числами. Характер зміни струму (форма струму) здебільшого визначається характером зміни е.р.с. (формою е.р.с.), може бути зображено за допомогою графіка, на якому по горизонтальній вісі відкладають час t а по вертикальній – величину струму або е.р.с. На рисунку 24 подано кілька графіків різних струмів. На графіку рис.24 а показано постійний струм, значення якого з часом не змінюється, завдяки цьому всі ординати графіка, що зображують значення сили струму, мають однакову висоту. На графіках в, г показано змінні струми (трикутний та синусоїдальний). Ординати, розташовані вище від горизонтальної вісі, зображують позитивний напрям струму, а нижче – негативний.

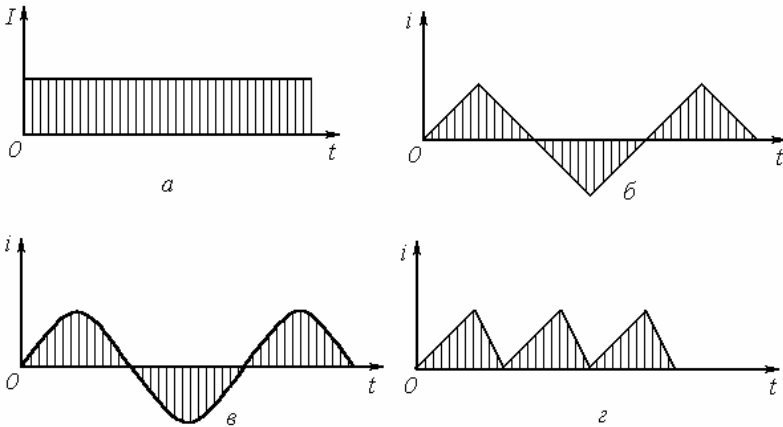


Рис.24. Графіки струмів:
а – постійного, б, в – змінних, г – пульсуючого

Довжина ординат у різних точках вісі часу неоднакова, і це означає, що сила струму з часом змінюється. На графіку зображено пульсуючий струм, який змінюється за величиною, але постійний за напрямком. Синусоїда дає можливість наочно спостерігати характер

зміни миттєвих значень синусоїдальної величини з часом, робити висновки про її амплітудне значення та інше. Проте це не єдиний спосіб зображення синусоїдальних величин.

Другим, не менш поширеним, є метод векторних діаграм, який особливо зручно застосовувати при одночасному розгляді кількох синусоїдальних величин. Суть цього методу полягає в тому, що синусоїдальна величина зображується за допомогою обертового радіуса-вектора, який називається вектором цієї синусоїдальної величини.

Розглянемо радіус-вектор E_m , який обертається навколо точки O з рівномірною кутовою швидкістю ω у додатній бік (рис.25 а). Положення OK цього радіуса-вектора прийемо за початкове, а за умовний додатній напрям обертання – обертання проти стрілки годинника.

Через час t_1 після початку обертання вектор займе положення E_{m1} , повернувшись за цей час на кут $\alpha = \omega t_1$. На момент часу t_2 він займе положення E_{m2} , на момент часу t_3 – положення E_{m3} і т.і. Якщо спроектувати радіус-вектор E_m на вертикальну вісь, коли він перебуває у різних положеннях, отримаємо відрізки $e_1 = E_{m1} \sin \omega t_1$; $e_2 = E_{m2} \sin \omega t_2$; $e_3 = E_{m3} \sin \omega t_3$ тощо.

З рисунка (24, а) видно, що за рухом вектора величина його проекції на вертикальну вісь змінюється, набуваючи то додатного, то від'ємного значення і досягаючи найбільшої величини при $\omega t = 90^\circ (\omega t_2)$ та $\omega t = 270^\circ$, коли вони досягають значення самого радіуса-вектора E_m . Таким чином у будь-який момент часу проекція вектора E_m на вертикальну вісь може бути виражена рівнянням $e = E_m \sin \omega t$.

З цього рівняння випливає, що проекція обертового радіуса-вектора E_m на вертикальну вісь з часом змінюється за законом синуса, а порівнявши його з $e = E_m \sin \omega t$ можна переконатись, що ці проекції являють собою миттєві значення величини, яка синусоїдально змінюється.

Якщо на горизонтальній вісі (рис. 24 б) у певному масштабі відкладати час t , а значення проекцій обертового радіуса-вектора на вертикальну вісь розташувати в часі вздовж цієї вісі, то сполучивши кінці їх безперервною кривою, можна одержати синусоїду, що показує, як змінюється проекція обертового радіуса-вектора на вертикальну вісь з часом. Звідси випливає, що ординати будь-якої синусоїди, які являють собою миттєві значення синусоїдальної величини, можна

розглядати як проекції певного обертового радіус-вектора, що по довжині дорівнює амплітудному значенню цієї синусоїдальної величини.

Такий обертовий радіус-вектор називають векторною діаграмою синусоїдальної величини, або просто вектором цієї величини.

Комплексним називають число, яке складається з дійсної та уявної величин (частин), тобто число виду $a+jb$. Така форма запису називається алгебраїчною формою комплексного числа. У цьому виразі, a – дійсна частина комплексного числа, jb – уявна його частина, причому символом j позначається уявна одиниця, а b – коефіцієнт біля уявної частини, який вказує на кількість уявних одиниць.

У цьому розумінні дійсну частину a можна вважати і коефіцієнтом поруч дійсної частини, оскільки це комплексне число можна записати і так: $1a+jb$, де 1 – символ дійсної (речової) одиниці, a – коефіцієнт, який вказує на кількість дійсних одиниць. Для запису дійсну одиницю писати не прийнято, тому коефіцієнт біля дійсної частини є одночасно і самою дійсною частиною.

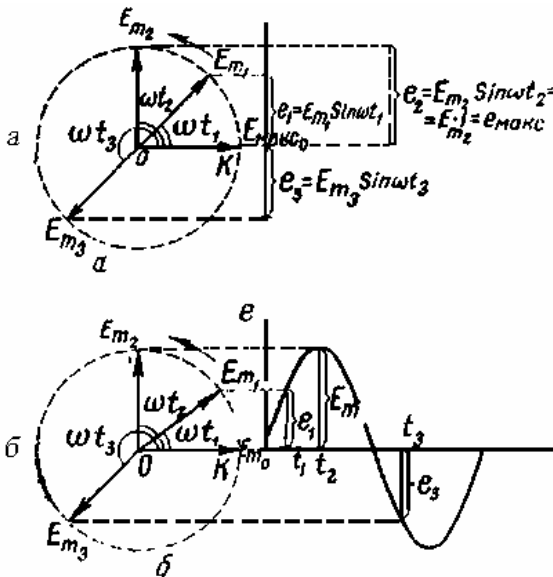


Рис. 25 Обертовий радіус-вектор і його проекція

Дійсні числа умовилися зображати відрізками на горизонтальній вісі (вправо – додатні, вліво – від’ємні). У такому випадку уявні числа необхідно зображати відрізками на вертикальній вісі (вгору – додатні, вниз – від’ємні). У зв’язку з цим горизонтальну вісь прийнято називати віссю дійсних величин, або дійсною віссю, а вертикальну – віссю уявних величин, або уявною віссю.

Комплексне число, яке складається з дійсної і уявної частин, визначає точку на площині, в якій лежать вісі координат. Абсолютне значення комплексного числа (вектора) називають його модулем і позначають буквою M . Напрямок вектора прийнято визначати кутом між вектором і додатним напрямом дійсної вісі α .

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{b}{a}. \quad (114)$$

Кут α називають аргументом комплексного числа (вектора).

Діючі значення струму, е.р.с. та напруги позначають прописними буквами без будь-яких значків (I, E, U), а комплексні вирази прийнято позначати буквами з крапкою зверху ($\dot{I}, \dot{E}, \dot{U}$). Модулі цих комплексів дорівнюють діючим значенням відповідних величин.

Додавання і віднімання проводять в алгебраїчній формі за правилами додавання або віднімання многочленів.

Множення комплексних чисел найзручніше використовувати в показниковій формі за правилами множення одночленів.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення змінного струму.
2. Назвіть сфери застосування змінного струму в сільському господарстві.
3. Як працює генератор змінного струму?
4. Назвіть параметри, які характеризують синусоїдальні функції.
5. Для чого застосовують часові і векторні діаграми?

1.5. ОДНОФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

1. Особливості електричних кіл змінного струму.
2. Коло змінного струму з активним опором.
3. Коло з індуктивністю.
4. Коло з ємністю.
5. Нерозгалужене коло синусоїдального струму з активним опором, індуктивністю і ємністю.
6. Векторна діаграма.
7. Трикутники напруг, опорів і потужностей.
8. Коефіцієнт потужностей.
9. Частотні характеристики кола з резистором, індуктивністю і ємністю.
10. Резонанс напруг, умови його виникнення та застосування.
11. Коло синусоїдального струму з паралельним з'єднанням резистора, котушки індуктивності, конденсатора.
12. Векторні діаграми.
13. Зсув фаз між напругою і струмом до розгалуження.
14. Резонанс струмів, умови його виникнення і практичне значення.
15. Компенсація реактивної потужності.

1. Особливості електричних кіл змінного струму. Якщо досліджувати опір одного і того самого провідника у колах постійного і змінного струму, то виявиться що для змінного струму він буде більший, а для постійного – менший. Опір провідника змінному струму називають активним опором цього провідника.

Через те, що індуктивний і ємнісний опори споживають реактивну потужність, їх називають реактивними опорами. У змішаних електричних колах відбувається обмін енергією між індуктивністю і ємністю, тобто ємність може розглядатись як джерело реактивної потужності для індуктивності, а індуктивність – як джерело реактивної потужності для ємності.

2. Коло змінного струму з активним опором Якщо на синусоїдну напругу $u = U_m \sin \omega \cdot t$ (115) увімкнути резистивний елемент (рис. 26), то у колі виникає миттєвий струм:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega \cdot t = I_m \sin \omega \cdot t \quad (116)$$

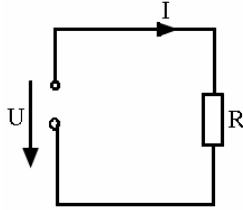


Рис. 26. Коло змінного струму з активним опором

Отже, струм у колі з активним опором, увімкнутим на синусоїдну напругу, є синусоїдним та збігається з напругою за фазою.

Векторна діаграма такого кола зображена на рис. 27. Вектор струму збігається за напрямом із вектором напруги: (зсув за фазою дорівнює нулю). Ці дві електричні величини мають лише дійсне значення.

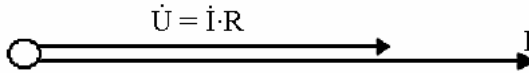


Рис. 27. Векторна діаграма кола з активним опором

3. Коло з індуктивністю. Якщо у колі з індуктивним елементом (рис. 28) протікає синусоїдний струм:

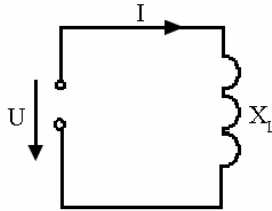


Рис. 28. Коло з індуктивним елементом

$$i = I_m \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (117)$$

то ЕРС самоіндукції:

$$e = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega \cdot t. \quad (118)$$

За другим законом Кірхгофа:

$$u + e = 0, \quad (119)$$

напругу можна записати співвідношенням

$$u = \omega \cdot L I_m \cos \omega \cdot t, \quad (120)$$

$$\text{або } u = U_m \cos \omega \cdot t, \quad (121)$$

$$\text{або } U_m = I_m \omega L. \quad (122)$$

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

Величина $X_L = \omega \cdot L$, Ом (123) має розмірність опору і називається індуктивним опором.

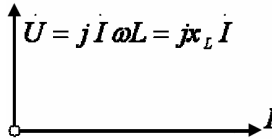


Рис.29. Векторна діаграма кола з індуктивністю

Векторна діаграма кола з індуктивністю наведена на рис. 29. Вектор напруги випереджає вектор струму на 90° (символ j показує, що вектор струму треба повернути на чверть періоду проти ходу часової стрілки).

4. Коло з ємністю. Якщо коло синусоїдного струму містить ідеальний ємнісний елемент (рис. 30), то струм змінюється за законом.

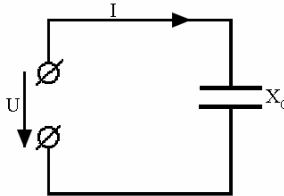


Рис.30. Коло з ємнісним елементом

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}, \quad (124)$$

$$\text{якщо } u = U_m \sin \omega t \quad (125) \text{ то } i = \omega C U_m \cos \omega t \quad (126)$$

або $i = I_m \cos \omega t$ (127), де

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega \cdot C}} \quad (128)$$

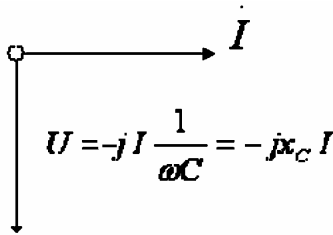


Рис.31. Векторна діаграма кола з ємністю

При вмиканні ємності на синусоїдну напругу у колі встановлюється синусоїдний струм, що випереджає напругу на чверть періоду. Індуктивність у колі постійного струму не має реактивного опору. Ємнісний опір $X_C = \frac{1}{\omega C}$ (129) постійного струму дорівнює нескінченності і зменшується під час підвищення частоти змінного струму та ємності елемента.

Векторна діаграма кола з ємністю наведена на рис. 31.

Положення вектора струму на $-j$ відповідає повороту цього вектора на 90° за ходом годинникової стрілки. Отже, у колі змінного струму з ємністю струм випереджає за фазою напругу на 90° .

5. Нерозгалужене коло синусоїдального струму з активним опором, індуктивністю і ємністю. При послідовному з'єднанні елементів (рис. 32) мають місце такі співвідношення для миттєвих, діючих значень та комплексів напруг

$$u = u_R + u_L + u_C \quad (130)$$

$$U = U_R + U_L + U_C, \quad (131)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (132)$$

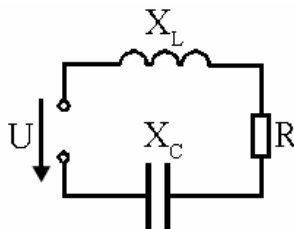


Рис.32. Нерозгалужене коло синусоїдального струму з активним опором, індуктивністю, ємністю

Вектор прикладеної напруги складається з геометричної суми спадів напруги на ділянках

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (133)$$

Якщо задані опори активний R , індуктивний X_L , ємнісний X_C , можна розрахувати повний опір кола

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (134)$$

Повний опір кола визначається відповідно:
для активно-індуктивного

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}; \quad (135)$$

для активно-ємнісного

$$Z = \sqrt{R^2 + (-X_C)^2}; \quad (136)$$

для індуктивно-ємнісного

$$Z = X_P = \sqrt{(X_L - X_C)^2} = X_L - X_C; \quad (137)$$

струм у колі визначають так:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (138)$$

а спади напруги на опорах

$$U_R = I \cdot R, \quad (139)$$

$$U_L = I \cdot X_L, \quad (140)$$

$$U_C = I \cdot (-X_C) = -I \cdot X_C, \quad (141)$$

$$U = I \cdot Z. \quad (142)$$

6. Векторна діаграма. Оскільки $U_R = IR$, (143) $\dot{U}_L = j \dot{I} X_L$ (144), $\dot{U}_C = -j \dot{I} X_C$ (145), векторна діаграма має вигляд, наведений на рис. 33.

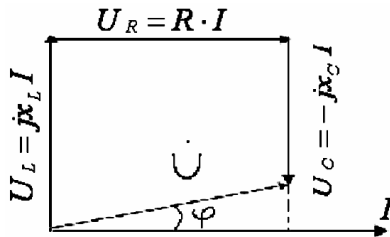


Рис.33. Векторна діаграма нерозгалуженого кола синусоїдального струму з R, L, C

З векторної діаграми можна записати вираз щодо комплексу напруги $\dot{U} = IR + j(X_L - X_C)\dot{I}$, (146a) або

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)} \quad (146б)$$

Модуль повного опору можна виразити як $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, (147) а φ -кут між струмом та напругою визначається за співвідношенням

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}. \quad (148)$$

7. Трикутник напруги, опорів і потужностей. Проекція вектора напруги на напрямок вектора струму називається активною складовою вектора напруги – U_a , а на напрямок, перпендикулярний струму – реактивною складовою вектора напруги – U_p .

$$U_a = U \cos \varphi, \quad (149) \quad U_p = U \sin \varphi \quad (150)$$

$$\text{Для котушки індуктивності: } U_a = U_R \quad (151); \quad U_p = U_L \quad (152)$$

Проекцію вектора струму на напрямок вектора напруги називають активною складовою вектора струму I_a , а на напрямок перпендикулярний напрузі – реактивною складовою вектора струму I_p .

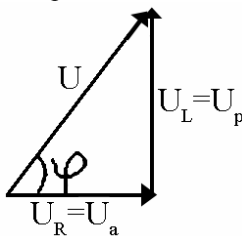


Рис.34. Трикутник напруги

З трикутника напруги випливає таке співвідношення:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad (153)$$

$$\text{або } U = I \cdot Z, \quad (154)$$

де Z – повний опір індуктивної котушки.

Трикутник опорів та трикутник провідностей будуть перетворенням векторних діаграм напруг.

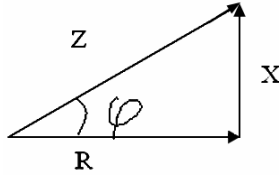


Рис. 35. Трикутник опорів

Для трикутника опорів мають місце співвідношення

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (155)$$

$$R = Z \cos \varphi \quad (156)$$

$$X = Z \sin \varphi, \quad (157)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}, \quad (158)$$

а для трикутника провідностей –

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad (159)$$

$$g = Y \cos \varphi, \quad (160)$$

$$b = Y \sin \varphi, \quad (161)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g}, \quad (162)$$

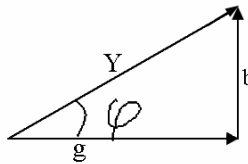


Рис.36. Трикутник провідностей

Кут φ (зсув фаз між струмом і напругою) той самий у цих трикутниках, тобто ці трикутники подібні.

За визначенням завжди $Y = \frac{1}{Z}$, (163) тому можна скласти спів-

відношення між опорами та провідностями $\frac{R}{Z} = \frac{g}{Y}$ (164).

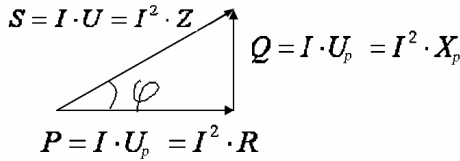


Рис.37. Трикутник потужностей

Трикутник потужностей має вигляд наведений на рис. 37
 Цей трикутник має співвідношення:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (165)$$

$$P = S \cos \varphi, \quad (166)$$

$$Q = S \sin \varphi, \quad (167)$$

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}. \quad (168)$$

8. Коефіцієнт потужностей. Активна потужність визначається співвідношенням (166) $P = S \cos \varphi$, звідки

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}. \quad (169)$$

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

Для підтримки високого значення $\cos \varphi$ треба додержуватися таких правил:

- не допускати тривалої роботи двигунів чи трансформаторів в холосту або з недовантаженням;
- правильно вибирати двигун за потужністю, частотою обертання та виконанням, застосовуючи переважно швидкохідні двигуни відкритого чи захищеного типу (залежно від умов роботи);
- застосовувати статичні конденсатори та синхронні компенсатори.

9. Частотні характеристики кола з резистором, індуктивністю і ємністю. При незмінних параметрах L та C умови резонансу можна виконати зміною частоти струму.

Резонансну частоту визначають за формулами:

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ - для резонансу напруги} \quad (170)$$

$$f_p = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C - r^2}} \text{ - для резонансу струмів} \quad (171)$$

Якщо активний опір r включити в гілку з ємністю C , тоді вираз частоти для резонансу струмів має вигляд

$$f_0 = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{L/C - r_1^2}{L/C - r_2^2}}. \quad (172)$$

З наданих формул можна зробити висновок: резонансна частота при резонансі струмів залежить не тільки від параметрів індуктивності й ємності, а й значень активних опорів r_1, r_2 .

10. Резонанс напруги, умови її виникнення та застосування.

У колах з послідовним з'єднанням реактивних елементів при виконанні умови $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ (173) має місце явище резонансу напруги. При незмінних параметрах L та C умову резонансу можна виконати зміною частоти струму.

У разі резонансу напруга індуктивності та ємності рівні. У разі резонансу:

$$\varphi = 0, \quad \cos\varphi = 1, \quad U = I \cdot R, \quad S = P. \quad (174)$$

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

$$R < \frac{1}{\omega C}, \quad \text{та} \quad R < \omega L \quad (175)$$

Величину реактивного опору при резонансній частоті називають хвильовим опором: $\rho_{xв} = \omega_0 L = \frac{L}{\sqrt{LC}}$; $\rho_{xв} = \sqrt{\frac{L}{C}}$. (176)

Добротністю контура (Q) називають відношення хвильового $\rho_{xв}$ опору до активного, тобто

$$Q = \frac{\rho_{xв}}{R}. \quad (177)$$

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

Під час резонансу струм у колі сягає максимального значення, а коефіцієнт потужності дорівнює одиниці.

Явище резонансу напруг небезпечне, бо може призвести до утворення на окремих ділянках кола напруг, які значно перевищують напругу мережі і, як наслідок, до пошкоджень обладнання.

11. Коло синусоїдального струму з паралельним з'єднанням резистора, котушки індуктивності, конденсатора.

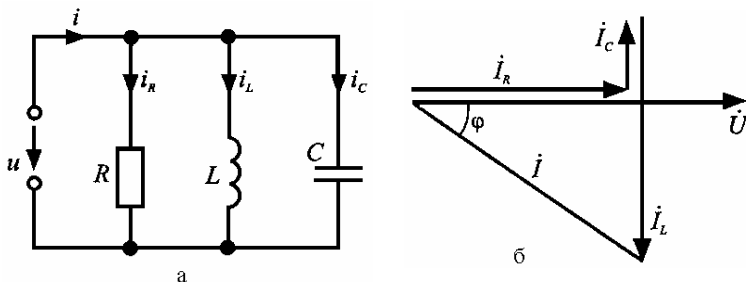


Рис. 38 Коло синусоїдального струму з паралельним з'єднанням резистора, котушки індуктивності та конденсатора:
а – схема з'єднання; б – векторна діаграма

При паралельному з'єднанні елементів (рис.38) рівняння за першим законом Кірхгофа для миттєвих значень та у комплексній формі мають такий вигляд:

$$i = i_R + i_L + i_C, \quad (178)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C. \quad (179)$$

Через провідності

g – активну,

b_L – реактивну індуктивну,

b_C – реактивну ємнісну

струми можна записати у вигляді:

$$\dot{I}_R = g\dot{U}, \quad (180)$$

$$\dot{I}_L = jb_L \dot{U}, \quad (181)$$

$$\dot{I}_C = jb_C \dot{U}. \quad (182)$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, векторна діаграма має вигляд, наведений на рис. 38,б.

Різницю $b_L - b_C = b$ називають реактивною провідністю.

Модуль повної провідності

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad (183)$$

а зсув фаз між струмом та напругою

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{g}. \quad (184)$$

Прямокутний трикутник векторної діаграми можна перетворити на трикутник провідностей (рис.36). Із цього трикутника випливають співвідношення між провідностями (159–162).

Прямокутний трикутник векторної діаграми дає також співвідношення

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}. \quad (185)$$

Це співвідношення є законом Ома в алгебраїчній формі для розгалуженого кола.

12. Векторні діаграми. Характер навантаження схеми або відношення між активним і реактивним опорам, а також зсув фаз визначають за векторною діаграмою (рис.39)

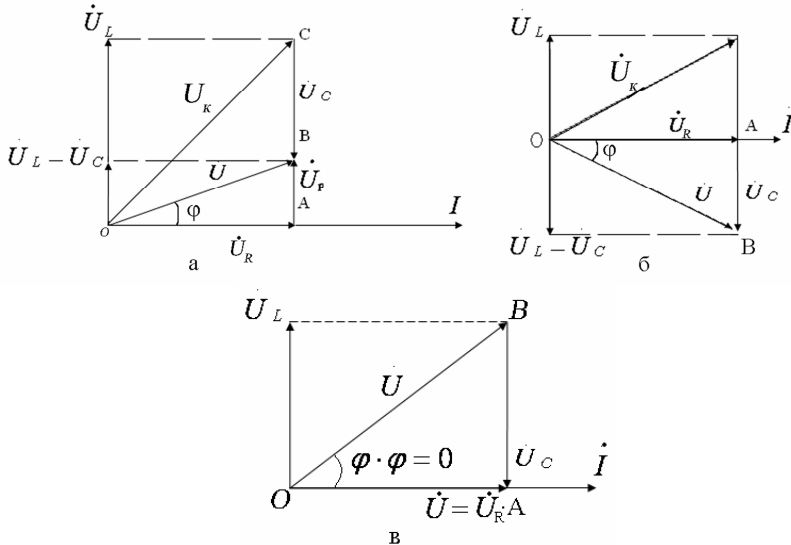


Рис. 39. Векторні діаграми при явно вираженому активно-індуктивному навантаженні (а), при активно-ємнісному (б) і резонансі напруг (в)

Векторні діаграми будуть так: обирають масштаб для струму і спадів напруги; вектор струму суміщають з віссю абсцис; вектор спаду

напруги на активному опорі співпадає за фазою із струмом; вектор спаду напруги на індуктивності випереджає за фазою вектор струму на 90° , а значить, його відкладаємо по вісі ординат вгору, складаємо геометрично вектори U_R і U_L , результуюча яких буде напругою на котушці індуктивності U_K і з кінця вектора U_K , відкладаємо вектор спаду напруги на ємності U_C ; замикаючий вектор OB і буде напругою U , вектор $U_P = U_L - U_C$ (186) буде реактивною напругою.

З трикутника напруг OAB можна знайти

$$U_R = U \cdot \cos \varphi, \quad (187)$$

$$U_P = U \cdot \sin \varphi. \quad (188)$$

Якщо спади напруги поділити на струм, одержимо трикутник опорів.

Перемноживши вектори спадів напруги на струм, одержимо трикутник потужностей.

13. Зсув фаз між напругою і струмом до розгалуження.

Зсувом фаз називається різниця початкових фаз двох будь-яких величин однієї частоти, які синусоїдально змінюються.

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (189)$$

де φ_u, φ_i – початкові фази напруги та струму

φ – кут між струмом і напругою, визначається за співвідношенням

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (190)$$

Зсув фаз (φ) вважають називним, коли $\omega L > \frac{1}{\omega C}$. (191)

14. Резонанс струмів, умови його виникнення і практичне застосування.

При паралельному з'єднанні активних, індуктивних і ємнісних опорів в колі виникає резонанс струмів. Умовою резонансу є рівність реактивних провідностей

$$b_L = b_C \quad (192)$$

або для схеми (рис. 38)

$$\frac{X_L}{Z^2} = \frac{1}{X_C}; \quad \frac{\omega_0 L}{R^2 + (\omega_0 L)^2} = \omega_0 C; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}\sqrt{L/(C-R^2)}}.$$

При резонансі струмів в колі спостерігаються такі явища: повна провідність дорівнює активній $y=g$, а значить, $\cos \varphi = 1$; струм в розгалуженій ділянці менший, ніж струм у вітках з індуктивністю і ємністю.

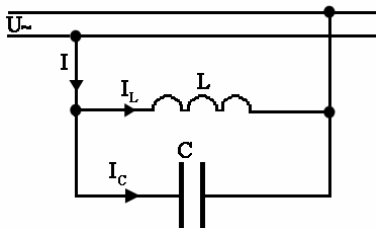


Рис 40. Коло змінного струму з індуктивним та ємнісним опорами

Явище резонансу струмів має велике практичне значення. Якщо до електродвигуна змінного струму, що має активний та індуктивний опори, паралельно приєднати конденсатор такої ємності, щоб у колі настав резонанс струму, тобто щоб $I_L = I_C$, то струм у живлючих проводах (загальний струм I (рис.40)) стане менший ніж струм, який споживає двигун. Струмове навантаження в підвідних проводах, трансформаторах на знижувальних підстанціях і генераторах електростанцій зменшиться. Отже, для живлення двигуна можна буде взяти провиди меншого поперечного перерізу, ніж при відсутності резонансу струмів. Необхідна потужність трансформаторів і генераторів при цьому знизиться.

15. Компенсація реактивної потужності. У колах з індуктивним навантаженням реактивна потужність витрачається на створення та підтримку магнітного поля. Вона безперервно переходить від генератора до індуктивного навантаження, де створює магнітне поле, а потім повертається до генератора.

Для компенсації реактивної потужності застосовують статичні конденсатори та синхронні компенсатори, які вмикають паралельно приймачеві.

В цьому випадку енергія магнітного поля двигуна частково або повністю накопичується за рахунок енергії електричного поля конденсаторів, і навпаки, генератор і провиди, які його з'єднують з колом двигун-конденсатор, розвантажуються від обмінної енергії (від реактивної складової струму).

Компенсація реактивної енергії дає значний економічний ефект: економія електричної енергії, зменшення втрат у повітряних і кабельних мережах.

Контрольні запитання

1. Як визначити з трикутника потужностей активну потужність?
2. Як розраховується коефіцієнт потужності?
3. Де застосовується резонанс напруги?
4. Як визначається добротність резонансного контура?
5. Як визначити повний опір кола з резистором, індуктивністю і ємністю?

1.6. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

1. Трифазні кола.
2. Одержання симетричної трифазної системи е.р.с. у трифазному генераторі.
3. Часові і векторні діаграми.
4. З'єднання обмоток генератора в зірку і трикутник.
5. Фазні і лінійні напруги та їх співвідношення.
6. Симетричний і несиметричний режими роботи трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою.
7. Роль нульового проводу.
8. Потужність трифазного кола.
9. Режими електричних кіл: номінальний, холостого ходу, робочий, короткого замикання.

1. Трифазні кола. Трифазне електричне коло – це сукупність трьох електричних кіл, що мають синусоїдну е.р.с. однакової амплітуди і частоти. Е.р.с. зсунуті за фазою на одну третину періоду. Ці е.р.с. генеруються в одному (зазвичай машинному) джерелі живлення, що об'єднуються в одну систему.

Трифазна система електричних кіл представляє собою сукупність трьох кіл, в яких діють три синусоїдальні е.р.с. однієї і тієї ж частоти, зсунуті одна відносно одної за фазою, які створюються одним джерелом енергії. Трифазна система електричних кіл, в якій окремі фази електрично з'єднані між собою називається трифазним колом. Джерелом електричної енергії в трифазних колах є трифазний генератор або трансформатор.

Трифазною системою напруг (струмів) називають сукупність синусоїдальних електричних напруг (струмів) однієї частоти, зсунутих одна відносно одної за фазою, діючих в трифазній системі електричних кіл.

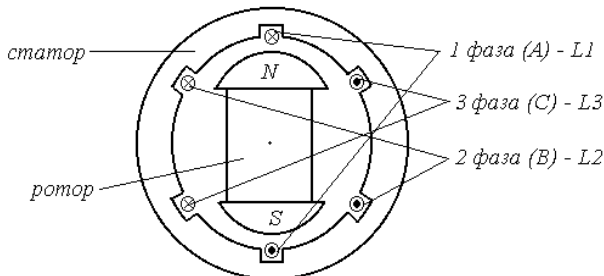


Рис.41. Трифазна система струмів

Генератор складається з нерухомого статора з трифазною обмоткою, укладеною в пази магнітопроводу і обертаючого ротора, який приводиться в рух за допомогою первинного двигуна (турбіна або двигун внутрішнього згорання).

Ротори більшості генераторів мають обмотку збудження, яка живиться від джерела постійного струму через контактні кільця. У генераторів малої потужності ротор може не мати обмотки, а виконується як постійний магніт. Обмотку кожної фази генератора виконують однаковою кількістю витків і вкладають у пази статора зі зміщенням по колу на 120° .

2. Одержання симетричної трифазної системи е.р.с. у трифазному генераторі. Під час обертання ротора його магнітний потік, перетинаючи обмотку фаз, наводить в них рівні по амплітуді синусоїдально змінювальні е.р.с. Завдяки тому, що обмотки зсунуті по колу статора одна відносно одної, е.р.с., які наводяться в них, зсунуті в часі на $1/3$ періоду (проміжок часу, який дорівнює часу проходження вісі ротора між провідниками фазних обмоток, які ідуть у пази).

3. Часові і векторні діаграми. Струм як і е.р.с. зображується синусоїдою. Ординати синусоїди – це миттєві значення синусоїдальної величини, розгорнуті в часі (по вісі часу), тому синусоїда часто називається розгорнутою або хвильовою діаграмою цієї величини.

Синусоїда дає можливість наочно бачити характер зміни миттєвих значень синусоїдальної величини з часом, робити висновки про її амплітудне значення та про інше.

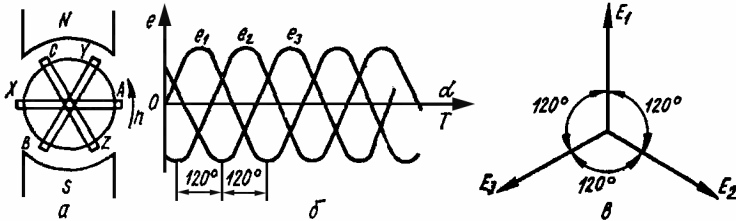


Рис.42. Модель генератора трифазного струму (а), хвилюва (б) та векторна (в) діаграми е.р.с. трифазної системи

Другим, не менш поширеним, є метод векторних діаграм, який особливо зручно застосовувати при одночасному розгляді кількох синусоїдальних величин. Суть цього методу в тому, що синусоїдальна величина зображається за допомогою обертового радіуса-вектора, який називається вектором цієї синусоїдальної величини.

Сукупність векторів, які зображають синусоїдальні е.р.с., напруги і струми однієї частоти, називається **векторною діаграмою**.

4. З'єднання обмоток генератора в зірку і трикутник. Трифазні генератори створюють практично симетричну систему напруг, окремі з яких рівні за амплітудою і відстають по фазі одна від одної на $2\pi/3$. Кожна з цих обмоток може самостійно жити однофазне навантаження. Для використання потужності всіх трьох фазних обмоток генератора необхідно вести від нього до споживача шість проводів. Однак у зв'язку з підвищеними витратами проводів така схема не використовується.

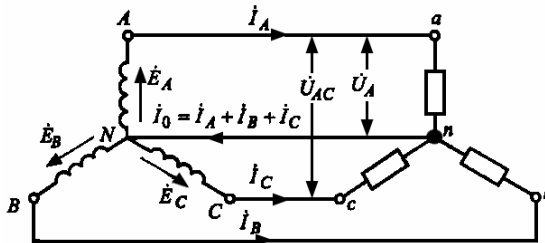


Рис.43. З'єднання "зіркою"

Для спрощення системи електропостачання споживачів енергії кінці обмоток трифазного генератора з'єднують разом, а початок обмоток під'єднують до проводів, які ідуть до споживачів енергії.



Рис.44. З'єднання обмоток генератора

Від з'єднаних разом кінців обмоток до споживачів іде один провід, який називається нейтральним або нульовим. Отримана чотирипровідна система під'єднання споживачів до генератора за витратами провідникового матеріалу, втратами енергії в проводах і за конструктивним виконанням економічно вигідніша від шестипровідної.

З'єднання обмоток генератора в зірку. Для з'єднання зіркою векторна діаграма має такий вигляд:

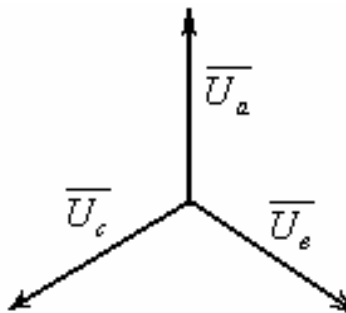


Рис.45. Векторна діаграма напруг при з'єднанні трикутником

При цьому напруга між початком обмоток сусідніх фаз повинна бути рівною геометричній різниці між напругами фаз.

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B; \quad (193)$$

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C; \quad (194)$$

$$\bar{U}_{AC} = \bar{U}_C - \bar{U}_A. \quad (195)$$

Для отримання різниці двох векторів достатньо до вихідного вектора додати від'ємний вектор зі зворотнім знаком. У результаті отримаємо: вектор лінійних напруг \bar{U}_{AB} , \bar{U}_{AC} , \bar{U}_{BC} , які є основою рівнобічного трикутника з кутами біля основи рівними 30° , більше за напругу фаз в $\sqrt{3}$ разів.

З трикутника OAB $AB = \frac{OA}{2}$.

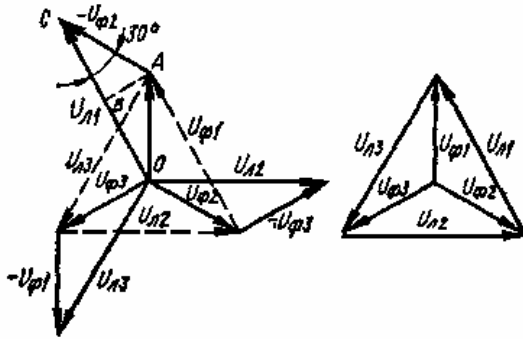


Рис.46. Векторна діаграма напруг при з'єднанні зіркою

$$OB = \sqrt{OA^2 - AB^2} = \sqrt{OA^2 - \left(\frac{OA}{2}\right)^2} = OA \sqrt{1 - \frac{1}{4}} = \frac{OA}{2} \sqrt{3}; \quad (196)$$

$$OC = 2OB = OA \cdot \sqrt{3}; \quad OC = U_{AB}; \quad OA = U_A; \quad U_{AB} = \sqrt{3}U_A, \quad (197, 198)$$

при з'єднанні зіркою без нульового проводу: $U_{\text{л}} = 1,73 U_{\phi}$ (199).

При з'єднанні обмоток генератора трикутником напруга між проводами лінії, яка відходить від генератора буде дорівнювати напругам, які виникають в обмотках кожної фази двигуна, тобто при з'єднанні обмоток генератора трикутником, його лінійні напруги дорівнюють фазним:

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} \quad (200)$$

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

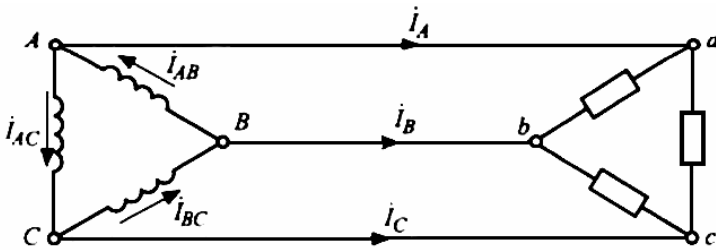


Рис.47. З'єднання обмоток генератора трикутником

Недолік з'єднання трикутником: нагрів обмоток генератора, зменшення енергетичних характеристик генератора.

При з'єднанні зіркою більш безпечним є обслуговування генератора, лінії і всіх електротехнічних установок. При заземленні нейтрального проводу випадкове доторкання до корпусу дорівнює U_{ϕ} . При з'єднанні трикутником дорівнює $U_{л}$.

5. Фазні і лінійні напруги та їх співвідношення. При з'єднанні зіркою лінійний струм є й фазним струмом.

$$I_{л} = I_{\phi}$$

Лінійні напруги є різницею відповідних фазних напруг

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$$

При з'єднанні трикутником лінійна напруга є і фазною напругою.

$$U_{л} = U_{\phi}$$

Лінійний струм:

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

6. Симетричний і несиметричний режими роботи. Залежно від величини та характеру електричного опору споживачів енергії система може бути симетричною і несиметричною.

Система з трьох е.р.с. рівних по амплітуді, які мають однакову частоту, зсунутих по фазі одна відносно одної на кут $2\pi/3$ називається симетричною трифазною системою е.р.с.

Трифазне коло, в якому активні і реактивні опори складових її фаз однакові називають симетричним. Несиметрія трифазного кола обумовлена різницею навантаження у фазах. Опір фаз може бути неоднаковий за величиною або складом активних і реактивних складових.

Несиметрію створюють однофазні споживачі (лампи електричного освітлення). Несиметрія виникає в аварійних ситуаціях (коротке замикання, обрив проводу).

7. Роль нульового проводу. Якщо розглянути топографічну діаграму кола при несиметричному навантаженні, то за наявності опору в нульовому проводі ($Z_N \neq 0$) нульова точка приймача на топографічній діаграмі не співпадає з нульовою точкою джерела. Тому напругу U_N називають напругою зміщення нейтралі. Внаслідок зміщення нейтралі напруги на фазах приймача будуть неоднаковими, не дивлячись на симетрію фазних напруг джерела.

Симетрію власних напруг на навантаженнях, коли $U_N = 0$, можна досягнути в двох випадках:

1. При симетричному навантаженні, коли комплекси провідностей фаз рівні $Y_A = Y_B = Y_C = Y$. У цьому випадку струм у нульовому проводі відсутній. Тому електропостачання симетричних приймачів здійснюється по трипровідній системі.

2. У чотирпровідній системі, коли опір нульового проводу дорівнює нулю.

Нульовий провід є врівноважувачем. За допомогою його потенціали нейтралі джерела і приймача примусово урівнені, а тому зірка векторів фазних напруг приймача точно співпадає з зіркою фазних напруг джерела.

Роль нульового проводу:

- дає можливість одержати в лінії при $U_n = 380$ В фазну напругу 220 В для живлення однофазних споживачів;
- нульовий провід виконує роль занулення.

Чотирипровідна система застосовується в електричних колах з напругою 380/220 В при електропостачанні від спільного джерела силового (електродвигуни) і освітлювального (електролампи) навантаження.

При несиметричному навантаженні обрив нульового проводу ($Z_N = \infty$) викликає значні змінення струмів і фазних напруг, що в більшості випадків є недопустимим, тому в нульовий провід запобіжники не встановлюють.

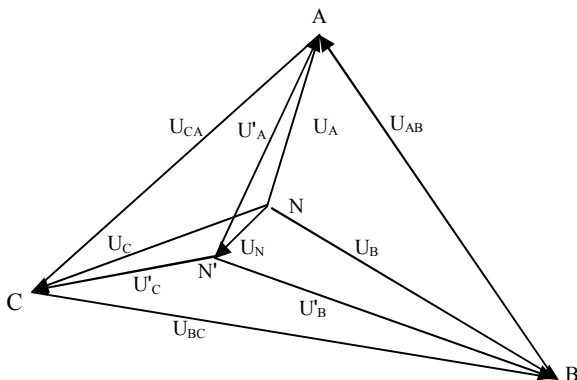


Рис. 48. Топографічна діаграма трифазного кола при з'єднанні приймачів зіркою і несиметричному навантаженні

8. Потужність симетричного трифазного кола. Як і в однофазному колі, у трифазному колі розрізняють активну, реактивну і повну потужності. Для несиметричних кіл: потужність трифазної системи дорівнює сумі потужностей, які споживаються навантаженнями кожної фази

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (201)$$

У випадку рівномірного навантаження загальна активна потужність дорівнює потроєній потужності будь-якої фази

$$P = 3P_\phi = 3I_\phi U_\phi \cos \alpha_\phi, \quad (202)$$

де I_ϕ та U_ϕ – фазні струми і напруга.

Якщо фазні значення струму і напруги визначати через лінійні, то отримаємо:

$$P = \sqrt{3}IU \cos \alpha, \quad (203)$$

де I та U – лінійні струм і напруга.

Для з'єднання зіркою

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \phi \quad (204)$$

Для з'єднання трикутником

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \phi, \quad (205)$$

тому для трифазної системи

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \phi; \quad (206)$$

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \phi; \quad (207)$$

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}. \quad (208)$$

9. Режими електричних кіл: номінальний, холостого ходу, робочий, короткого замикання. Режим роботи електричного кола визначається значенням струмів напруг і потужностей його окремих елементів. Джерела і приймачі електричної енергії проводу, а також допоміжна апаратура і прилади характеризуються номінальними величинами струму, напруги, потужності та інше, на які ці прилади розраховані заводами-виробниками. Номінальні величини зазвичай наводяться в паспорті приладу.

Режим роботи, при якому дійсні струми, напруги, потужності елементів електричного кола відповідають їх номінальним значенням називається **номінальним (нормальним)**.

Режими електричного кола з різних причин можуть відрізнятися від номінального. Якщо в електричному колі дійсні характеристики режиму відрізняються від номінальних величин її елементів, але відхилення знаходяться в допустимих межах, то режим називається **робочим**.

Режим електричного кола або окремих джерел, за якого струм в них дорівнює нулю називається режимом **холостого ходу**. При холостому ході напруга на зовнішніх затискачах джерела дорівнює його е.р.с.

Режим електричного кола, при якому коротко замкнено ділянку з одним або декількома елементами, називається **режимом короткого замикання**. Коротке замикання в електричних установках не бажані, оскільки струм короткого замикання в декілька разів перевищує номінальний, що призводить до різкого збільшення виділення тепла у струмопровідних частинах.

Контрольні запитання

1. Опишіть принцип роботи трифазного генератора.
2. Які є схеми з'єднання обмоток генератора?
3. Яка будова трифазного генератора?
4. Чому в нульовий провід не ставлять запобіжники?
5. Яка роль нульового проводу?
6. В якому випадку симетричний режим роботи електричного кола перетворюється на несиметричний?

1.7. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

1. Методи вимірювання.
2. Похибки при вимірюванні.
3. Класифікація електровимірювальних приладів.
4. Прилади магнітоелектричної, електродинамічної, електромагнітної й індукційної систем.
5. Вимірювання струмів, напруг, опорів, потужності й електричної енергії.
6. Розширення границь вимірів.
7. Вимірювання неелектричних величин електричними методами.

1. Методи вимірювання. Виміряти яку-небудь електричну величину – це значить порівняти її з однорідною величиною, яку умовно прийнято за одиницю. Електричні вимірювання відіграють у техніці велику роль. За їх допомогою контролюється робота окремих машин, агрегатів та електроустановок. Тільки вимірюючи різні величини і порівнюючи їх між собою і з вихідними даними, можна вести технологічний процес найраціональніше.

Без електричних вимірювань неможлива механізація процесів, а особливо автоматизація виробничих процесів, бо автоматичне керування процесом може здійснитися лише після того, як відповідні прилади зареєструють відхилення процесу від норми.

Методи вимірювань поділяються на прямі і непрямі. Непрямим називається такий метод, при якому шукана величина безпосередньо не вимірюється, а обчислюється на основі вимірювання інших величин. Прикладом може бути метод вимірювання опору провіднику за допомогою амперметра і вольтметра, за яким вимірюють струм у провіднику і напругу на його затискачах, а шуканий опір обчислюють за законом Ома.

В електротехнічній практиці непрямі методи широкого поширення не набули, оскільки вони не забезпечують великої точності, потребують проведення обчислень, великих затрат часу і великої кількості приладів.

Прямі методи поділяються на методи безпосередньої оцінки і методи порівняння. При методі безпосередньої оцінки вимірювану величину визначають безпосередньо за показами вимірювального приладу, проградуйованого у значеннях вимірюваної величини (вольтах, амперах, ватах тощо). При методах порівняння вимірювану величину визначають, порівнюючи її з мірою даної величини. До методів

порівняння належать: нульовий метод; диференціальний метод; метод заміщення.

При нульовому методі дія вимірюваної величини зрівноважується зустрічною дією відомої величини того самого роду. Прикладом може бути вимірювання $e.p.c.$ компенсацією її відомою напругою.

Диференціальний метод передбачає вимірювання різниці між відомою і шуканою величинами.

За методом заміщення шукану величину знаходять заміщенням її відомою величиною такого значення, при якому це заміщення не викликає зміни показів вимірювальних приладів.

У виробничих умовах найбільшого поширення набув метод безпосередньої оцінки, як найпростіший і такий, що потребує мінімум часу для вимірювань.

2. Похибки при вимірюванні. Вимірювання ніколи не може бути абсолютно точним, і результат вимірювання завжди в більшій чи меншій мірі відрізняється від справжнього значення вимірюваної величини. Це пояснюється неточністю вимірювальних приладів, недосконалістю методів вимірювання, недосконалістю органів чуття і впливом усяких випадкових факторів.

Похибки вимірювання поділяються на три класи: систематичні; випадкові; помилки.

Систематичними вважають такі похибки, які при повторних вимірюваннях даної величини залишаються незмінними або змінюються за певним законом, тому їх можна вивчити, врахувати і їх вплив на результат вимірювання звести до мінімуму.

До систематичних похибок належать:

- інструментальні (через недосконалості або несправності вимірювального приладу);
- похибки установки (через неправильне установлення вимірювального приладу);
- методичні (через недосконалості методів вимірювання);
- особисті (через особисті якості того, хто вимірює).

До випадкових належать похибки, спричинені випадковими факторами, зміна яких не підпорядкована якійсь певній закономірності.

Під помилками розуміють похибки, які явно спотворюють результати вимірювання (неправильний запис результату вимірювання, неправильний відлік по шкалі, помилки під час обчислень). Вимірювання з помилками треба відкидати як явно недостовірні.

Абсолютною похибкою ΔA вимірювального приладу називають різницю між показом A приладу і дійсним значенням A_d вимірюваної величини

$$\Delta A = A - A_d. \quad (209)$$

Під дійсним значенням вимірюваної величини розуміють її значення, виміряне еталонним вимірювальним приладом. Слід пам'ятати, що дійсне значення не є істинним.

Відношення абсолютної похибки приладу до найбільшого значення вимірюваної величини, яке є на шкалі приладу, виражене у відсотках, називають відносною зведеною похибкою цього вимірювального приладу.

$$\gamma_{зв} = \frac{\Delta A}{A_{\max}} \times 100\%, \quad (210)$$

де $\gamma_{зв}$ – відносна зведена похибка;

A_{\max} – максимальне значення вимірюваної величини на шкалі приладу (номінальне значення).

Кожна з розглянутих похибок може бути основною і додатковою. Під основною розуміють похибку, яку має прилад при нормальних умовах експлуатації (нормальне положення приладу, температура навколишнього повітря 20 ± 5^0 , відсутність зовнішніх полів тощо). Додатковою називають похибку, яка виникає в результаті відхилення умов роботи приладу від нормальних.

Найбільша основна зведена похибка, яку може мати даний прилад, визначає клас точності цього приладу.

3. Класифікація електровимірювальних приладів. Усі прилади безпосередньої оцінки (крім лічильників електричної енергії) за ступенем точності поділяються на 8 класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Номер класу вказує на максимальну величину відносної зведеної похибки, яку може мати прилад, і записаний на його шкалі. У приладах випуску до 1960 року клас точності обведений кружечком, а в приладах пізнішого випуску це число кружечком не обводиться.

За класом точності можна робити висновки про точність вимірювання, якщо обчислювати величину абсолютної похибки, яку може дати прилад.

$$3 \text{ рівняння } \Delta A = \frac{\gamma_{зв} A_{\max}}{100}. \quad (211)$$

Дійсне значення виміряної величини може відхилитися від результату вимірювання в той чи інший бік на ΔA .

Приклад 1. Під час вимірювання напруги вольтметром класу точності 0,5, розрахованим на напругу 300 В вимірено 200 В. Визначити, в яких границях перебуває дійсне значення виміряної напруги.

Розв'язування. Абсолютна похибка, яку може дати прилад,

$$\Delta U = \frac{0,5 \times 300}{100} = 1,5 \text{ В} \quad (212)$$

Дійсне значення виміряної напруги $U_d = 200 \pm 1,5 \text{ В}$, тобто дійсне значення напруги лежить в межах 198,5—201,5 В.

Якщо така точність виявиться недостатньою, то для вимірювання слід використати прилад вищого класу точності.

Приклад 2. Під час вимірювання напруги цим самим вольтметром він показав 20 В. Визначити границі дійсного значення напруги.

Розв'язування. Оскільки в цього приладу абсолютна похибка $\Delta U = 1,5 \text{ В}$, то $U_d = 20 \pm 1,5 \text{ В}$, тобто дійсне значення напруги лежить у межах 18,5—21,5 В.

З цих прикладів видно, що прилади слід вибирати з такими границями, щоб під час вимірювання стрілка опинилась у другій половині шкали, якнайближче до номінального значення приладу, оскільки похибка в 1,5, а відносно до 200 В практично нічого не становить (0,75%), а від 20 В ці 1,5 В становлять вже помітну величину (7,5%).

Коли б у другому прикладі був використаний вольтметр на 30 В, то його абсолютна похибка становила б

$$\Delta U = \frac{0,5 \times 30}{100} = 0,15 \text{ В}, \text{ а } U_d = 20 \pm 0,15 \text{ В}, \quad (213)$$

тобто величина вимірюваної напруги була б визначена в десять разів точніше.

Крім поділу за ступенем точності, усі прилади поділяються за видом вимірюваних величин (табл. 1).

За видом струму електровимірвальні прилади поділяються на прилади, призначені для постійного струму, однофазного змінного, постійного і змінного і трифазного. За принципом дії вони поділяються на різні системи залежно від фізичного явища, яке використовується.

4. Прилади магнітоелектричної, електродинамічної, електромагнітної та індукційної системи. Тепер найбільше використовуються прилади магнітоелектричної, електромагнітної, електродинамічної, феродинамічної, індукційної, вібраційної, електростатичної, випрямної і електронної систем.

Таблиця 1

Поділ приладів за видом вимірюваних величин

Вимірювана величина	Назва приладу	Умове позначення приладу	Вимірювана величина	Назва приладу	Умове позначення приладу
Струм	Амперметр		Електрична енергія	Лічильник ватгодин	
	Кілоамперметр			Лічильник кіловат-годин	
	Міліамперметр		Зсув фаз	Фазометр	
	Мікроамперметр		Частота	Частотомір	
Напруга	Вольтметр		Електричний опір	Омметр	
	Кіловольтметр			Мегомметр	
	Мілівольтметр		Ємність	Фарадометр	
Електрична потужність	Ватметр		Магнітний потік	Веберметр (флюксметр)	
	Кіловатметр		Величина залежно від градуювання шкали спостерігачем	Гальванометр	

За ступенем захищеності від зовнішніх полів прилади поділяються на чотири категорії, які позначаються римськими цифрами I, II, III, IV. Додаткова похибка від зовнішніх полів для цих категорій відповідно не повинна перевищувати 0,5; 1,0; 2,5; 5%.

Якщо прилад захищений від впливу зовнішніх магнітних полів, то знак категорії на шкалі приладу обводиться суцільним квадратом. Захист від електричного поля підкреслюється тим, що цей квадрат обводиться пунктиром. Для першої категорії захисту цифра не ставиться.

Залежно від умов експлуатації прилади поділяються на три групи:

- група А – прилади, призначені для роботи в сухих опалюваних приміщеннях;

- група Б – для роботи в закритих неопалюваних приміщеннях;

- група В – для роботи в польових і морських умовах.

Група приладу позначається на шкалі відповідною буквою (крім групи А).

Існують і інші класифікації: за герметичністю, механічною дією, формою кожуха, способом монтажу, габаритними розмірами, умовами експлуатації тощо.

Щоб мати уявлення про параметри приладу і його особливості, на шкалі, крім класу точності, категорії і групи, наносять ряд інших знаків. Основні з них наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Умовні позначення вимірювальних приладів

Знак	Пояснення	Знак	Пояснення
	Магнітоелектрична система: з механічною протидіючою силою		Феродинамічна система: механічною протидіючою силою
	без механічної протидіючої сили		без механічної протидіючої сили
	Електромагнітна система з механічною протидіючою силою		Індукційна система з механічною протидіючою силою
	Електродинамічна система: з механічною протидіючою силою		Електростатична система
	без механічної протидіючої сили		Вібраційна система
0,1	0,1%		Ізоляція приладу, випробувана напругою 2 кВ
0,2	0,2%		Категорія захищеності приладу від зовнішніх полів
0,5	0,5%		Група приладу за умовами експлуатації
1,0	1,0%		Вертикальна установка приладу
1,5	1,5%		Горизонтальна установка
2,5	2,5%		
—	Постійний струм		
~	Змінний струм		
3~50 Гц	Трифазний струм 50 Гц		

Основні деталі приладів і вимоги, які ставлять до електромагнітних приладів. Кожний вимірювальний прилад складається з окремих деталей, причому деякі з них спільні для більшості приладів. До таких деталей належать кожух, шкала, стрілка, заспокоювач, коректор, вісі, під'ятники, пружини та балансуєчі тягарці.

Шкали приладів звичайно виготовляють з листової сталі, латуні, цинку або пластмаси. Для збільшення чіткості їх фарбують білою фарбою, на яку наносять поділки тушшю або чорною фарбою. Шкали приладів бувають рівномірними (рис. 49, а) і нерівномірними (рис. 49, б). Прилади конструюють так, щоб шкали в них були рівномірними, оскільки рівномірна шкала є значною перевагою приладу. Прилади класу 0,5 і більшої точності мають дзеркальну шкалу (рис. 49, в), яка зменшує похибку відліку, що виникає в тих випадках, коли на стрілку дивляться трохи збоку (рис. 49, г) і стрілка проєктується не на ту поділку, на якій вона знаходиться.

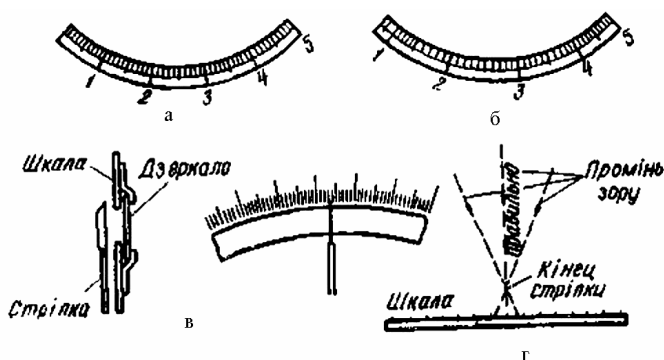


Рис. 49. Шкали вимірювальних приладів:
 а – рівномірна; б – нерівномірна; в – дзеркальна;
 г – використання дзеркальної шкали

За наявності дзеркала відлік роблять при такому положенні ока, при якому стрілка закриває своє зображення в дзеркалі. При цьому промінь зору буде перпендикулярним до шкали.

Стрілки виготовляють з алюмінію або його сплавів. У приладах класу 0,5 і точніших звичайно використовують ножовидні стрілки, а в інших приладів – найчастіше списовидні.

Вісь, на якій закріплюється рухома частина механізму, виготовляють з дроту діаметром 1–2 мм, кінці вісі заточують на конус і

старанно полірують. Іноді в кінці вісі запресовують керни з твердішого матеріалу (рис. 50, а).

Керни вісі спираються на підп'ятники. У точніших приладах підп'ятники виготовляють з каменю (рубіну, сапфіру, агату), а у менш точних – з твердої сталі або фосфористої бронзи. Підп'ятник укріплюють в упорному гвинті, який утримується від обертання контрґайкою або стопорним гвинтом (рис. 50, б).

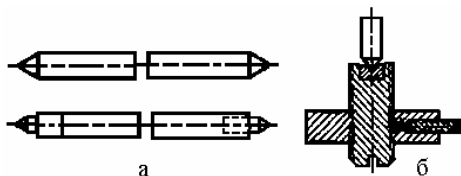


Рис. 50. Вісі і підп'ятники:

а – конструкція осей; б – конструкція підп'ятника

Пристрої, які створюють протидіючий момент. У більшості приладів протидіючий момент створюється пласкими спіральними пружинами (рис.51, а) з олов'яно-цинкової або фосфористої бронзи. Пружини повинні мати сталі пружні властивості. У деяких приладах пружини використовуються і для підведення струму в рухому частину механізму. У цих випадках встановлюють по дві пружини відповідно меншої пружності.

У приладів високої чутливості рухому частину іноді підвішують на стрічкових розтяжках (рис. 51, б), що значно спрощує і полегшує її конструкцію.

У деяких випадках протидіючий момент створюється самою рухомою частиною приладу. У цьому випадку вона має два робочих елементи (наприклад, дві рамки, розміщені перпендикулярно одна до одної і укріплені на одній вісі). Кожний робочий елемент створює обертаючий момент; вони не дорівнюють один одному, але спрямовані в протилежні боки (рис. 51, в), тому рухома система намагається зайняти положення, при якому моменти зрівноважуватимуть один одного. Такі вимірювальні механізми називаються логометрами.

Коректором називають пристрій, за допомогою якого можна встановити стрілку в нульове положення (коригувати нульове положення стрілки), якщо з якихось причин вона у вільному стані зупиняється не на нулі. Коректор складається з циліндричної головки, яка може обертатися в кожусі приладу навколо своєї вісі (рис. 51, г). У

внутрішній торець головки ексцентрично вкручений палець 3, який зчеплений з вилкою 2 поводка. Повертаючи головку 1, за допомогою пальця 3 відводять вилку вправо або вліво, закручуючи чи розкручуючи пружину 4 і добиваючись встановлення стрілки 5 у нульове положення.

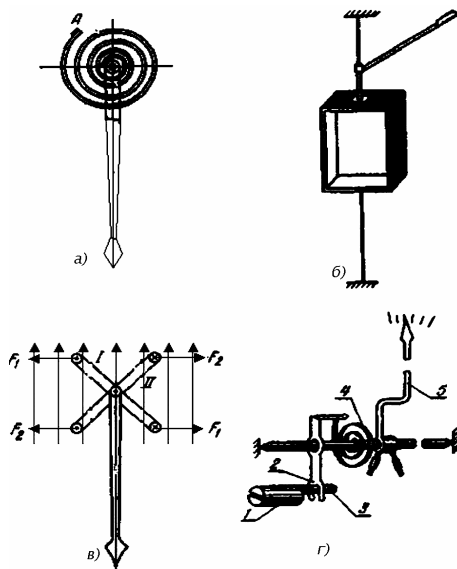


Рис. 51. Пристрій, які створюють протидіючий момент:
 а – пружина; б – розтяжки (підвіски); в – створення протидіючого моменту другим робочим елементом; г – коректор; 1 – голівка, 2 – вилка, 3 – палець, 4 – пружина, 5 – стрілка

Заспокоювачем називають пристрій, за допомогою якого гасяться коливальні рухи стрілки, що виникають після кожного вмикання приладу або зміни режиму в колі. Рухаючись від нуля до положення рівноваги, рухома частина проходить це положення за інерцією і закручує пружину на кут, більший від кута, який відповідає положенню рівноваги. Під впливом сили пружності пружини рухома частина починає рухатись у зворотний бік, знову за інерцією проходить положення рівноваги і, таким чином, як маятник, здійснює коливання навколо положення рівноваги.

Зараз використовують заспокоювачі двох типів: повітряні і магнітоіндукційні. Повітряний складається із закритої камери 1 (рис. 52, а), всередині якої, не торкаючись її стінок, може рухатися легке крило-поршень 2, зв'язане з рухомою частиною механізму. Під час руху крила в будь-якому напрямі з одного боку від нього повітря стискується, а з другого – розріджується. Різниця тисків, спрямована проти руху крила, гальмує (заспокоює) рухому частину механізму.

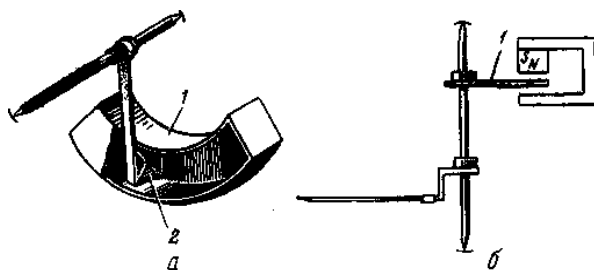


Рис.52. Заспокоювачі:

*а – повітряний: 1 – закрыта камера; 2 – рухома частина;
б – магнітоіндукційний: 1 – алюмінієвий сектор*

Магнітоіндукційний заспокоювач складається з алюмінієвого сектора 1 (рис. 52, б), який рухається між полюсами сильного магніту. Під час руху в секторі індуються вихрові струми, які, взаємодіючи з полем магніту, гальмують коливний рух рухомої частини механізму (згідно з правилом Ленца сила взаємодії спрямована назустріч руху сектора 1).

Вимоги до електровимірювальних приладів. Електровимірювальний прилад відповідає нормам тоді, коли він задовольняє такі вимоги:

- основна відносна зведена похибка не перевищує встановленої для того класу, до якого належить прилад;
- величина похибки не змінюється з часом;
- додаткові похибки, спричинені зміною температури, зовнішнього магнітного або електричного полів, не перевищують значень, встановлених ДСТУ;
- прилад дає змогу безпосередньо відлічувати вимірювану величину за встановленими одиницями;
- шкала приладу достатньо рівномірна;
- прилад має хороший заспокоювач;
- ізоляція приладу задовольняє вимоги ДСТУ;
- перевантажувальна здатність приладу досить висока;

-
- прилад простий щодо конструкції і дешевий;
 - потужність, споживана приладом, незначна.

Під споживаною приладом потужністю розуміють кількість енергії, що витрачається в приладі за одиницю часу. Більша частина її йде на нагрівання електричного кола приладу, а, отже, призводить до небажаної зміни його параметрів. Крім того, величина споживаної потужності має вирішальне значення при вимірюваннях у мало-потужних колах, оскільки прилад, який споживає більшу потужність, дуже змінює режим у колі. Іноді потужність, споживана з кола приладами, повинна бути найменшою і з точки зору економії енергії.

Електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки низької і високої чутливості.

Вимірювальні прилади магнітоелектричної системи.

Принцип дії цих приладів ґрунтується на взаємодії рамки зі струмом з магнітним полем. Якщо в магнітне поле вмістити рамку зі струмом (рис. 53, а), то на активні сторони її діятимуть сили F ; вони створять обертаючий момент, величина якого при незмінному магнітному полі буде пропорційна до струму в рамці, тобто $M_{об} \propto I$.

Якщо руху рамки протидіятиме пружина, то кут повороту стане пропорційний до обертаючого моменту, а отже, і до сили струму в рамці. Пропустивши вимірювальний струм через рамку, за кутом її повороту можна робити висновки про силу цього струму. Практично магнітне поле в приладах магнітоелектричної системи створюється за допомогою постійного магніту 1 (рис. 53, б), між башмаками 5 якого укріплено нерухоме точно центроване осердя 6 з м'якої сталі. Між циліндричними поверхнями башмаків і осердя є однаковий (в радіальному напрямі) повітряний зазор, в якому утворюється сильне рівномірне радіальне спрямоване магнітне поле. У цьому полі розміщується рамка з кількох десятків або сотень витків тонкого дроту, намотаного на прямокутний алюмінієвий каркас 2 , який укріплений на двох півосях 3 і утримується від обертання двома спіральними пружинами 4 .

Струм у рамку підводиться через піввісі і пружини, тому застосування двох півосей замість одної вісі і двох пружин дає можливість підводити струм без будь-якого спеціального пристрою.

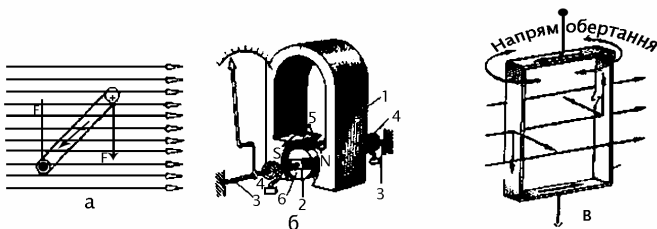


Рис. 53. Вимірювальний прилад магнітоелектричної системи:
а – принцип дії; б – схема будови: 1 – постійний магніт, 2 – каркас, 3 – півосі, 4 – пружини, 5 – баїмаки, 6 – осердя; в – утворення моменту, що гасить коливання рухомої системи

Оскільки в тій частині повітряного зазору, де рухаються активні сторони рамки, магнітне поле рівномірне і в усіх точках цієї частини розташовується радіально, то по мірі повороту рамки її активні сторони рухаються весь час перпендикулярно до поля і величина діючих на рамку сил під час її обертання не змінюється. Тому величина обертаючого моменту в міру повороту рамки теж не змінюється і шкала приладу виявляється рівномірною.

Завдяки тому, що рамка приладу перебуває в сильному магнітному полі, дія на прилад зовнішніх магнітних полів стає практично непомітною. При цьому прилад виявляється досить чутливим і не потребує спеціального заспокоювача.

Колівання стрілки навколо положення рівноваги гасяться так: під час усякого руху рухомої системи змінюється магнітний потік, який пронизує алюмінієвий каркас 2, і в ньому індукуються е. р. с. Оскільки каркас – це короткозамкнутий виток (рис. 53, в), то під впливом цієї е. р. с. в ньому протікає струм i_m , який створює своє магнітне поле. За правилом Ленца, сили F_L , що виникли під час взаємодії цього поля з полем магніту, спрямовані проти сил, які спричиняють рух рухомої системи, тому коливання стрілки швидко зменшуються.

Під чутливістю приладу до струму розуміють кут повороту його рухомої системи, що відповідає одиниці вимірюваного струму:

$$S_i = \frac{\alpha}{I}, \quad (214)$$

де S_i – чутливість приладу до струму;

α – кут повороту рухомої системи під час проходження по ній струму.

Величина, обернена чутливості, виражає собою струм, який відповідає одиниці кута повороту, і називається сталою до струму.

Із зміною напрямку струму напрям обертаючого моменту змінюється і стрілка приладу відхиляється вліво. Тому прилади магнітоелектричної системи не можна застосовувати в колах змінного струму безпосередньо.

Перевагами цих приладів є: рівномірність шкали; велика точність (аж до класу 0,05); висока чутливість (до 5 под/мкА); незначний вплив температури; мала споживана потужність (може становити кілька мікватт); незалежність показів від дії зовнішніх магнітних полів.

Завдяки цим якостям прилади магнітоелектричної системи застосовуються як амперметри і вольтметри в колах постійного струму, витіснивши прилади інших систем. У поєднанні з випрямлячами ці прилади можуть бути використані і в колах змінного струму. Разом з тим вони мають і ряд недоліків: їх можна використовувати лише в колах постійного струму, вони чутливі до перенавантажень (через пружини, які в разі перенавантаження перегріваються і втрачають свої пружні властивості), мають порівняно високу вартість.

Вимірювальні прилади електродинамічної системи. Принцип дії приладів електродинамічної системи аналогічний принципу дії приладів магнітоелектричної системи, але в перших зовнішнє магнітне поле створюється не постійним магнітом, а нерухомою котушкою, по якій проходить струм. Практично ця котушка складається з невеликого числа витків товстого дроту (рис. 54, а).

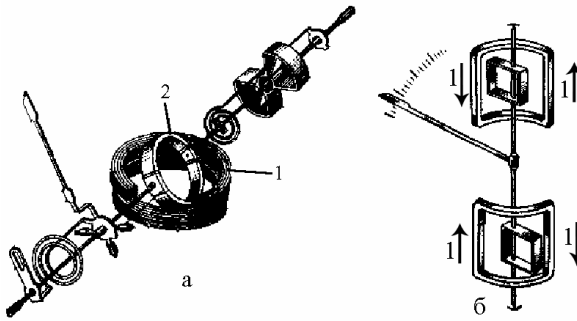


Рис. 54. Вимірювальний прилад електродинамічної системи:
а – схема будови: 1 – нерухома котушка, 2 – рухома система;
б – астатичний механізм

Конструкція рухомої системи 2 нічим не відрізняється від аналогічної конструкції для приладів магнітоелектричної системи.

Якщо по нерухомій котушці пропустити струм I_1 , а по рухомій – струм I_2 , то рамка, по якій тече струм I_2 , опиниться в магнітному полі нерухомої котушки 1 і на неї, як і в приладах магнітоелектричної системи, діятиме обертаючий момент. Він залежатиме від величини струмів I_1 та I_2 , оскільки взагалі обертаючий момент виникає в результаті взаємодії магнітних потоків котушок (Φ_1 та Φ_2), які самі залежать відповідно від струмів I_1 та I_2 .

$$\text{Отже, } M_{06} \equiv \Phi_1 \Phi_2 \equiv I_1 I_2 \quad (215)$$

Залежність обертаючого моменту від двох струмів дає можливість використати ці прилади не тільки в колах постійного, а й у колах змінного струму. Дійсно, із зміною напрямку струму I_1 змінюється і напрям магнітного потоку Φ_1 , в якому знаходиться рамка; від цього має змінитись на зворотний і напрям сил F , які діють на рамку. Але разом із зміною напрямку струму I_1 змінює свій напрям і струм в рамці I_2 , а від цього напрям обертаючого моменту змінюється на зворотний не раз і таким чином стає попереднім.

Отже, у міру того, як змінний струм змінює свій напрям, обертаючий момент діє весь час в один бік, змінюючись за величиною в міру зміни сили струму. Через інерційність рухома система приладу не може встигати за миттєвими змінами обертаючого моменту і її відхилення буде пропорційне середньому значенню обертаючого моменту M_{cp} за період T .

Миттєве значення обертаючого моменту в певний момент часу

$$T_{06} = K \Phi_1 \Phi_2, \quad (216)$$

де K – коефіцієнт пропорційності;

Φ_1 та Φ_2 – миттєві значення магнітних потоків котушок в цей момент часу.

Оскільки коефіцієнт пропорційності K – величина стала, то характер зміни обертаючого моменту повністю визначається характером зміни добутку $\Phi_1 \Phi_2$ з часом, тому за графіком цього добутку можна спостерігати характер зміни обертаючого моменту. Більш того, цей графік можна вважати і графіком обертаючого моменту, оскільки він повністю подібний до останнього і всі його ординати лише менші від відповідних ординат дійсного графіка T_{06} в однакове число раз (в K , раз).

У зв'язку з цим в усіх міркуваннях про обертаючий момент можна користуватися графіком добутку $\Phi_1 \Phi_2$ і лише в остаточний

результат треба ввести коефіцієнт пропорційності K , тобто збільшити його в K раз.

На рис. 55 зображено графіки добутку $\phi_1\phi_2$ для випадків, коли магнітні потоки за фазою збігаються, не збігаються на певний кут α і не збігаються на 90° . З цих рисунків видно, що середнє значення добутку $\phi_1\phi_2$ (а значить, і середнє значення обертаючого моменту) залежить не тільки від величини магнітних потоків, а й від кута зсуву фаз між ними, причому воно виявляється пропорційним до косинусу цього кута ($\cos\alpha$). Дійсно, якщо $\alpha=0$, то $\cos\alpha=1$, і середнє значення добутку буде максимальним.

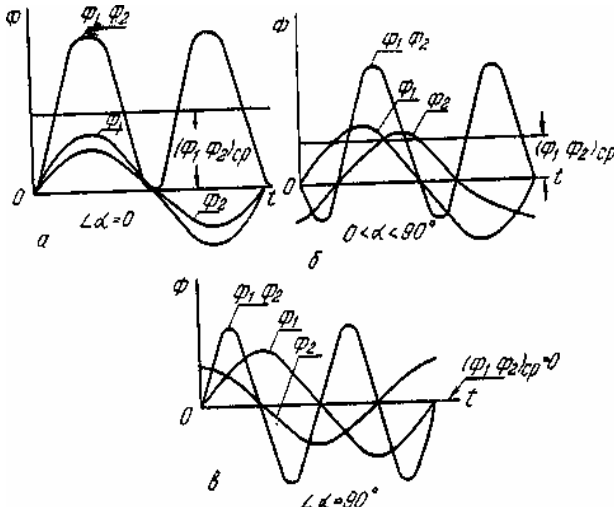


Рис. 55. Графіки добутків магнітних потоків приладу електродинамічної системи:

- а* – коли магнітні потоки збігаються по фазі;
- б* – коли вони не збігаються на $\alpha < 90^\circ$;
- в* – коли не збігаються на 90°

Із збільшенням кута α косинус його зменшується і середнє значення добутку магнітних потоків також зменшується. Коли $\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$, і середнє значення добутку магнітних потоків дорівнюватиме нулю, оскільки графік добутку стає симетричним відносно вісі часу.

Таким чином, з рисунків випливає, що середнє значення обертаючого моменту пропорційне магнітним потокам котушок і косинусу кута зсуву фаз між ними.

$$M_{cp} = K\Phi_1\Phi_2\cos\alpha, \quad (217)$$

де Φ_1 та Φ_2 – діючі значення магнітних потоків у котушках.

Оскільки система не містить сталених осердь, то магнітне поле в цих приладах слабке і каркас рухомої котушки не може виконувати ролі заспокоювача. Тому в приладах електродинамічної системи, як правило, встановлюють повітряні заспокоювачі. З тієї ж самої причини ці прилади значною мірою піддаються впливу зовнішніх магнітних полів.

Для зменшення додаткової похибки від зовнішнього магнітного поля використовують механізми астатичного пристрою, які мають дві нерухомі і дві рухомі котушки (рис. 57, в). Нерухомі котушки з'єднані між собою послідовно, але так, що поля їх направлені в протилежні боки. Струми в рухомих котушках також спрямовані в протилежні боки. Завдяки цьому обертаючі моменти обох елементів збігаються за напрямом і на вісь із стрілкою діє певний сумарний обертаючий момент. Якщо прилад зазнає впливу будь-якого зовнішнього магнітного поля, то завдяки різним напрямкам полів нерухомих котушок одне з них зовнішнім полем підсилюватиметься, а друге в такій самій мірі послаблюватиметься. В результаті цього обертаючий момент, створений одним елементом, збільшиться, а другим – в такій самій мірі зменшиться. Сумарний обертаючий момент, що діє на вісь, залишиться незмінним. Практично, якщо зовнішнє магнітне поле однорідне, то вплив його на покази астатичного механізму зовсім не відчувається.

До позитивних властивостей приладів електродинамічної системи належать: майже рівномірна шкала; велика точність (до класу 0,1); можливість використання в колах як постійного, так і змінного струму; наявність двох чутливих елементів (дві котушки, які впливають на кут повороту рухомої системи).

Ці прилади мають і недоліки: залежність показів від зовнішніх магнітних полів; чутливість до перенавантажень; відносно велика споживана потужність (звичайно 6–10 Вт, але у деяких приладів може досягати 20–25 Вт); висока вартість.

Механізми електродинамічної системи найчастіше застосовуються в приладах, призначених для вимірювання потужності в колах постійного і змінного струмів, або в амперметрах і вольтметрах висо-

кого класу точності (0,2; 0,1), також призначених для вимірювання в колах постійного і змінного струмів.

Вимірювальні прилади феродинамічної системи. Прилади феродинамічної системи є різновидом електродинамічних, але відрізняються від них тим, що у перших зовнішнє магнітне поле, в якому знаходиться рамка із струмом, створюється котушкою з сталеним осердям.

Конструктивно вони схожі на прилади магнітоелектричної системи, але постійний магніт замінений осердям з магнітно-м'якої сталі, на якому розміщена котушка 2 (рис. 56).

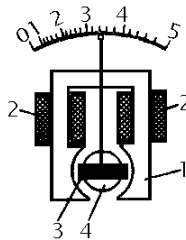


Рис. 56. Схема будови приладу феродинамічної системи:

1 – осердя I; 2 – котушка; 3 – рамка; 4 – осердя II

Під час проходження струму по нерухомій котушці осердя 1 намагнічується і рамка 3 з струмом потрапляє в магнітне поле. У результаті цього на неї діє обертаючий момент, і рухома система обертається. Осердя 4 конструктивно виконане так само, як і в приладах магнітоелектричної системи, і має таке саме призначення.

Обертаючий момент, як і в приладах електродинамічної системи, пропорційний до струмів у котушках. Оскільки в приладах феродинамічної системи він залежить від двох струмів, то ці прилади можна використати і в колах змінного струму, причому у цьому випадку обертаючий момент, як і в приладах електродинамічної системи, залежить не тільки від величини магнітних потоків, а й від кута зсуву фаз між ними

$$M_{об} = K\Phi_1\Phi_2\cos\alpha, \quad (218)$$

де Φ_1 та Φ_2 – магнітні потоки в обмотках;

α – кут зсуву фаз між ними;

K – коефіцієнт пропорційності.

Завдяки наявності сталюого осердя в повітряному зазорі, в якому розташована рухома котушка 3, магнітна індукція досягає значної величини, тому і обертаючий момент у цих приладах великий. Це дає можливість збільшити вагу рухомої частини, а отже, і її міцність без збільшення похибки від тертя, а також використати їх як самописні прилади, в яких для руху пера потрібне невелике зусилля. Велика магнітна індукція в зазорі робить покази приладу практично незалежними від зовнішніх магнітних полів. Проте наявність сталі збільшує основну похибку від гістерезису і вихрових струмів.

Для заспокоєння рухомої системи використовуються повітряні або магнітоіндукційні заспокоювачі.

Використати для заспокоєння каркас рухомої котушки 3, як це робиться в приладах магнітоелектричної системи, неможливе, тому що обмотку котушки роблять або безкаркасною, або на неметалевому каркасі, оскільки наявність металевого каркаса призвело б до появи в ньому індукваних струмів у разі використання приладу в колах змінного струму.

Переваги приладів феродинамічної системи: великий обертаючий момент; міцність конструкції; надійність у роботі; незалежність показів від зовнішніх магнітних полів.

Недоліки цих приладів: чутливість до перевантажень (до напруги); залежність показів від частоти; невисока точність; відносно велика споживана потужність (від 0,15 до 10 Вт, залежно від типу і границь вимірювання приладу).

Вимірювальні прилади електромагнітної системи. Принцип дії приладів електромагнітної системи ґрунтується на явищі втягування сталюого осердя в котушку з струмом.

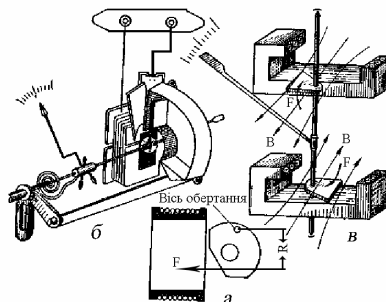


Рис. 57. Вимірювальний прилад електромагнітної системи:

а – принцип дії; б – схема будови; в – схема будови астатичного механізму

У більшості випадків стальне осердя – це диск, закріплений на вісі ексцентрично, а котушку роблять плоскою з щілинним отвором (рис. 57, а, б). Під час проходження струму по котушці осердя намагнічується і втягується в неї. Сила F , що виникає при цьому, створює обертаючий момент, і рухома система обертається.

Пружину підбрано так, щоб кут повороту рухомої системи пропорційний до обертаючого моменту, причому останній пропорційний до квадрату сили струму в котушці

$$M_{об} = KI^2, \quad (219)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

З цього рівняння випливає, що шкала приладу квадратична, але змінюючи форму осердя і його розміщення, можна досягти рівномірності шкали в її робочій частині.

Для заспокоєння рухомої системи використовують повітряні або магнітоіндукційні заспокоювачі. Оскільки величина обертаючого моменту залежить від напруженості поля, створеного нерухомою котушкою, то накладання на нього зовнішнього магнітного поля, природно, веде до зміни величини обертаючого моменту, а отже, і додаткової похибки вимірювання. Індукція власного магнітного поля невелика, тому додаткова похибка від зовнішніх полів може мати досить значну величину.

Вплив зовнішніх полів можна дещо зменшити, екрануючи механізм стальними екранами. У приладах класу 0,5 для зменшення додаткової похибки від зовнішніх магнітних полів використовують механізми астатичного пристрою. Як і в приладах електродинамічної системи – це два механізми, які діють на спільну вісь, на якій укріплена стрілка (рис.57, в). Котушки ввімкнуті так, що їх магнітні поля спрямовані в протилежні сторони, але, незважаючи на це, обертаючі моменти механізмів мають однаковий напрям, завдяки чому на вісь діє певний сумарний обертаючий момент.

Якщо на астатичний механізм діятиме зовнішнє магнітне поле і якщо у зв'язку з цим магнітне поле одного з механізмів, наприклад, посилиться, то у другого механізму воно буде на стільки ж ослабленим, оскільки поля котушок мають протилежні напрями. Таким чином, в результаті дії зовнішнього магнітного поля обертаючий момент одного механізму зростає, а другого на стільки ж зменшиться, тому результативний момент, що діє на нерухома систему, залишиться попереднім.

Прилади електромагнітної системи можна застосовувати в колах постійного і змінного струмів, тому що зміна напрямку струму хоч і спричиняє зміну напрямку магнітного поля котушки, але не змінює напрямку сили F , а отже, і обертаючого моменту, оскільки сталеве осердя втягується обома полюсами котушки однаково.

Перевагами цих приладів є: простота конструкції; міцність і надійність у роботі; використання в колах постійного і змінного струмів; стійкість до перевантажень; низька вартість.

Недоліки цих приладів: залежність показів від зовнішніх магнітних полів; відносно невисока точність (не вище класу 0,5).

Механізми електромагнітної системи застосовуються в амперметрах і вольтметрах, призначених для вимірювання в колах постійного і змінного струмів або тільки в колах змінного струму.

Вимірювальні прилади індукційної системи. Принцип дії приладу індукційної системи ґрунтується на явищі взаємодії між вихровими струмами, що проходять у рухомій частині приладу, і магнітними потоками, які створюються в його нерухомій частині. У результаті взаємодії між вихровими струмами і магнітними потоками на рухому частину діє обертаючий момент, і вона обертається.

З самого принципу дії випливає, що прилади індукційної системи можуть бути використані тільки в колах змінного струму, оскільки в колах постійного струму вихрові струми не виникатимуть.

Вимірювальний механізм індукційної системи складається з двох електромагнітів 1 та 2 (рис. 58, а), між полюсами яких розміщений алюмінієвий диск 3, укріплений на вісі OO_1 . Під час проходження струмів по обмотках в осердях електромагнітів створюються потоки Φ_1 та Φ_2 . Потік Φ_1 пронизує диск двічі в різних напрямках (рис. 58, б). Потік Φ_2 ділиться на дві частини: допоміжний потік Φ_1 , який замикається через бокові стержні 5 електромагніту, і робочий потік Φ_2 , який пронизує диск один раз і замикається через сталеву планку 4 (протиполнос).

Пронизуючи диск, робочі потоки індукують у ньому вихрові струми. На рис. 58, в показано розподіл вихрових струмів, їх напрями і напрями магнітних потоків в осердях, які ми прийемо за додатні.

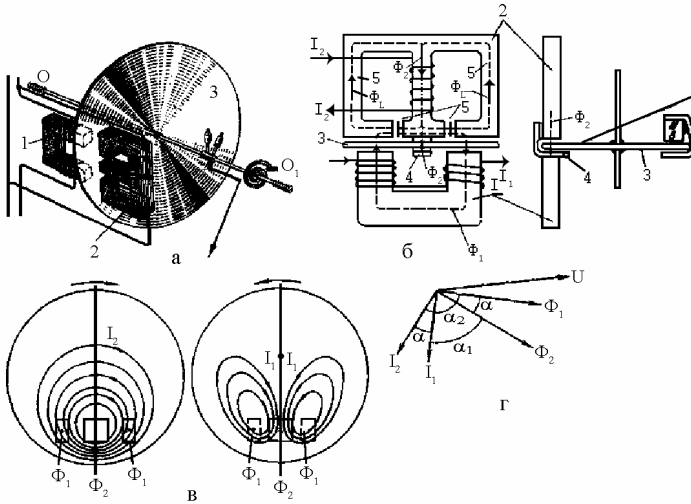


Рис. 58. Вимірвальний прилад індукційної системи:

а – схема будови: 1,2 – електромагніти, 3 – диск, 4 – сталевая планка, 5 – бокові стержні; *б* – магнітні потоки в осердях; *в* – вихрові струни в диску; *г* – векторна діаграма струмів і магнітних потоків

За правилом лівої руки можна визначити, що струми I_1 , взаємодіючи з потоком Φ_2 , намагаються повернути диск проти годинникової стрілки. Струми, взаємодіючи з потоком Φ_1 , обертають диск у протилежний бік.

Таким чином, на диск діють два обертаючих моменти M_1 та M_2 , додатні напрямки яких протилежні.

$$F = \Phi I \frac{l \sin \alpha}{S}, \quad (220)$$

тобто електромагнітна сила взаємодії між струмом і магнітним потоком, отже, і обертаючий момент, пропорційні до добутку ΦI . Оскільки в даному разі йдеться про величини, які змінюються синусоїдально, то миттєві значення обертаючих моментів

$$m_1 = \Phi_2 i_1, \text{ а } m_2 = \Phi_1 i_2 \quad (221)$$

Через інерційність диск не може встигати за швидкими змінами обертаючих моментів, тому його відхилення пропорційне до різниці середніх значень цих обертаючих моментів.

Середнє значення добутку двох синусоїдальних величин пропорційне їх діючим значенням і косинусу кута зсуву фаз між ними, тобто

$$M_1 = \Phi_2 I_1 \cos \alpha_1, \text{ а } M_2 = \Phi_1 I_2 \cos \alpha_2, \quad (222)$$

де α_1 – кут зсуву фаз між потоком Φ_2 і вихровими струмами I_1 ;
 α_2 – відповідний кут зсуву фаз між потоком Φ_1 і вихровими струмами I_2 .

У загальному випадку магнітні потоки Φ_1 та Φ_2 не збігаються за фазою один відносно одного на певний кут α . На векторній діаграмі (рис. 58, з) зображені магнітні потоки Φ_1 та Φ_2 і струми, які вони індукують у диску. Ці струми відстають від магнітних потоків, що їх створили, на кут 90° . Це пояснюється тим, що диск – суто активний опір, тому струми в ньому збігаються за фазою з е.р.с., а останні відстають від магнітних потоків, що їх створили, на кут 90° .

З цієї діаграми

$$\alpha_1 = 90^\circ - \alpha; \quad \alpha_2 = 90^\circ + \alpha;$$

$$M_1 = \Phi_2 I_1 \cos(90^\circ - \alpha) = \Phi_2 I_1 \sin \alpha, \quad (223)$$

$$M_2 = \Phi_1 I_2 \cos(90^\circ + \alpha) = \Phi_1 I_2 (-1) \sin \alpha, \quad (224)$$

тому що

$$\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha, \text{ а } \cos(90^\circ + \alpha) = -\sin \alpha. \quad (225)$$

Оскільки вихрові струми $I_1 = \Phi_1$, а $I_2 = \Phi_2$,

$$\text{то } M_1 = \Phi_2 \Phi_1 \sin \alpha, \quad M_2 = -\Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha, \quad (226)$$

або

$$M_1 = K_1 \Phi_2 \Phi_1 \sin \alpha, \quad M_2 = -K_2 \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha, \quad (227)$$

де K_1 і K_2 – коефіцієнти пропорційності.

Рівнодіючий момент, що діє на диск

$$M = M_1 - M_2 = K_1 \Phi_2 \Phi_1 \sin \alpha - K_2 \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha = (K_1 - K_2) \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (228)$$

$$\text{Остаточно} \quad M = K \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (229)$$

де $K = K_1 - K_2$ – результуючий коефіцієнт пропорційності;

α – кут зсуву між робочими магнітними потоками.

З останнього рівняння випливає, що обертаючий момент, який діє на диск, пропорційний до синусу кута зсуву фаз між робочими магнітними потоками Φ_1 та Φ_2 і досягає найбільшої величини при $\alpha = 90^\circ$, бо при цьому $\sin \alpha = 1$.

Оскільки магнітні поля в цих приладах сильні, то практично впливу дії зовнішніх полів вони не зазнають.

Обертаючий момент у цих приладах досягає значної величини, що дає змогу рухому їх частину робити досить міцною і надійною в

роботі, але наявність сталі збільшує основну похибку від гістерезису і вихрових струмів. Крім того, покази їх значно залежать від частоти.

Для гасіння коливань рухомої системи цих приладів використовують магнітоіндукційні заспокоювачі. Магніт заспокоювача розміщують так, щоб алюмінієвий диск опинився між його полюсами.

Тому всякий рух диска призводить до появи в ньому вихрових струмів, які, взаємодіючи з полем постійного магніту, дуже гальмують і гасять коливання рухомої системи.

Переваги приладів індукційної системи такі: можливість одержання рівномірної шкали; великий кут повороту рухомої частини (до 270^0); великий обертаючий момент; мала чутливість до перенавантажень; мала чутливість до впливу зовнішніх магнітних полів; велика міцність рухомої частини і надійність у роботі.

Недоліки цих приладів: невисока точність (не вище класу 1,0); велика залежність показів від частоти і форми кривої струму; залежність показів приладу від температури; відносно велика споживана потужність (до 100 Вт).

Механізми індукційної системи використовують у приладах, призначених для вимірювання потужності або енергії в колах змінного струму.

Вимірювальні прилади електростатичної системи. Принцип дії цих приладів ґрунтується на взаємодії між електрично зарядженими тілами.

На рис.59 наведено схему будови механізму електростатичної системи. Між двома нерухома закріпленими пластинками 1 та 2 укріплена нерухома пластинка 3. Коливаючись на двох підвісках, вона може, віддаляючись від пластинки 1, наблизитись до пластинки 2. Пластинки 1 та 3 електрично з'єднані одна з одною, а пластинка 2 від них ізольована. Рух пластинки 3 відрегульовано так, що з другою з'єднатись електрично вона не може.

Якщо пластинки 1 та 3, з'єднані одна з одною, під'єднати до одного полюса вимірюваної напруги, а пластинку 2 – до другого, то рухома пластинка 3, відштовхуючись від однойменно зарядженої зарядом протилежного знака, переміщуватиметься до останньої (вправо). Цей рух за допомогою тяги 4 передається стрілці, і вона відхиляється на певний кут.

Протидіючий момент створюється підвісами або спіральною пружиною, змонтованою на вісі стрілки. Величина обертаючого моменту залежить від різниці потенціалів. Розрахунки показують, що обертаючий момент пропорційний до квадрату прикладеної напруги.

З цього рівняння видно, що шкала такого приладу нерівномірна. Підбираючи форми пластин, можна досягти майже повної рівномірності шкали. Ці прилади можуть бути використані тільки для вимірювання напруги. Приладами, побудованими за розглянутою схемою, можна вимірювати напругу від 1 до 15 кВ, оскільки при меншій напрузі обертаючий момент, що діє на рухому систему, занадто малий. Багатопластинчасті вимірювальні механізми дають можливість вимірювати напруги від 20 В.

Прилади електростатичної системи можна застосовувати в колах постійного і змінного струмів, оскільки із зміною полярності напруги змінюються знаки зарядів на всіх пластинах одночасно, завдяки чому напрям сили, що діє на рухому пластинку 3, залишається попереднім.

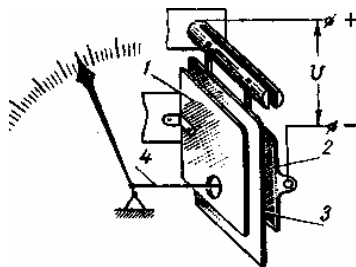


Рис. 59. Схема будови вимірювального приладу електростатичної системи:

1, 2 – нерухомі пластинки; 3 – рухома пластинка; 4 – тяга

Для гасіння коливань рухомої системи застосовують повітряні і магнітоіндукційні заспокоювачі.

Переваги приладів електростатичної системи: можливість застосовувати в колах постійного і змінного струмів; незалежність показів від частоти і форми напруги; практично повна відсутність споживання потужності приладом; незалежність показів від зовнішніх магнітних полів.

Недоліки цих приладів: залежність показів від зовнішніх електричних полів; невисока точність (не вище класу 1,0); мала чутливість; відносно висока вартість.

Логометри. Логометрами називають прилади, які вимірюють відношення двох струмів. Логометром може бути будь-який з розглянутих механізмів, якщо протидіючий момент в них створити не пружиною, а так само, як і обертаючий момент. Таким чином, в логометрі

мають створюватися два моменти, спрямовані один назустріч іншому, тому рухома система обертається в бік більшого з них.

Конструктивно логометр зроблено так, щоб у міру повороту рухомої системи більший з моментів зменшується, а менший збільшується. Поворот рухомої системи припиняється, коли моменти стають рівними. Таким чином, у логометрах пружин нема і у вимкненому стані стрілка може перебувати на будь-якій поділці шкали в положенні байдужої рівноваги.

У логометрах магнітоелектричної системи на півосях встановлюють не одну, а дві рамки, скріплені одна з одною під кутом 45° (рис.60, а). Через особливу форму осердя магнітна індукція в повітряному зазорі розподілена нерівномірно. Найбільшого значення вона досягає в точках, які лежать на вісі 00_1 де зазор найменший.

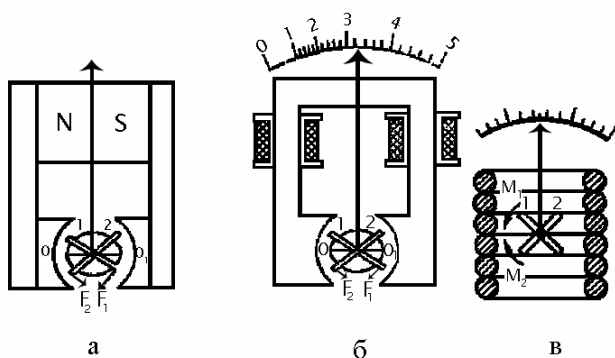


Рис.60. Логометри:
а – магнітоелектричний; б – феродинамічний;
в – електродинамічний

У точках, що лежать на вісі, перпендикулярній до першої, повітряний зазор найбільший, і магнітна індукція в них мінімальна.

Струми, які треба порівняти, пропускаються через обмотки рамок, причому їх напрями в обмотках вибираються так, щоб сили F_1 та F_2 , які діють на активні сторони рамок, були спрямовані в протилежні боки. У загальному випадку, завдяки нерівномірному розподілу магнітної індукції в зазорі і нерівності струмів, обертаючі моменти, створені силами F_1 і F_2 , не дорівнюють один одному, і рамки повертаються в бік більшого (припустимо, в бік дії сили F_1).

Обертаючись, рамка 1 переходить у зони з меншою магнітною індукцією, а рамка 2 – в зони з більшою. Тому в міру повороту рухомої системи момент M_1 зменшується, а M_2 – збільшується. Поворот рамок припиняється, коли моменти зрівнюються. Оскільки величини моментів залежать від струмів в обмотках і від положення рамок, то положення стрілки на шкалі залежить від співвідношення між струмами, де α – кут повороту рухомої системи відносно нульового положення, при якому стрілка знаходиться на нулі шкали.

Феродинамічний логометр має майже таку саму будову, як і логометр магнітоелектричної системи, але зовнішнє магнітне поле в ньому створюється не постійним магнітом, а електромагнітом. По його обмотці пропускають струм від того самого джерела, яке живить і рухомі рамки (рис. 60, б). І в цих приладах положення рухомої системи залежить від відношення струмів у рамках, хоч в колах змінного струму положення рухомої системи не залежить і від кутів зсуву фаз між струмами в обмотці збудження і струмами в рамках.

У логометрі електродинамічної системи рухомі рамки розміщені під кутом 90° один до одного всередині нерухомої котушки. Ця котушка створює магнітне поле, з яким взаємодіють рамки (рис. 60, в).

Принцип дії електродинамічного логометра не відрізняється від розглянутих, і положення рухомої системи також визначається відношенням струмів у рамках, а в колі змінного струму воно залежить ще і від зсуву фаз між струмом у нерухомій котушці і струмом у рамках.

Логометри найчастіше використовуються у приладах, призначених для вимірювання опору, частоти і коефіцієнта потужності.

Основні відомості про будову і застосування приладів високої чутливості. Прилади високої чутливості використовуються для вимірювання незначних струмів і напруг. Коли потрібно виміряти слабкий струм або малу напругу, використовують мікроамперметри і мікрвольтметри. Головна вимога до цих приладів – їх точність.

Іноді потрібно лише виявити факт наявності або відсутності струму в колі, хоча б і дуже малого (наприклад, під час вимірювань нульовим методом). Прилади, якими для цього користуються, називаються нульовими покажчиками. Від них вимагається висока чутливість, а їх точність практично не відіграє ролі. Шкалу нульових покажчиків градує сам спостерігач.

Як нульові покажчики часто використовуються гальванометри різних систем. Гальванометром називають прилад безпосередньої оцінки, який має велику чутливість, шкалу якого градує сам спостерігач.

Найбільшого поширення набули гальванометри магнітоелектричної системи, які являють собою звичайний магнітоелектричний механізм з кріпленням рухомої частини на розтяжках або підвісах, із стрілковим або дзеркальним відліком (рис. 61, а, б). Розтяжки і підвіси, як і пружини, виготовляють з фосфористої або олов'янисто-цинкової бронзи.

Висока чутливість досягається завдяки тому, що протидіючий момент розтяжок або підвіса значно менший, ніж у пружини, тому навіть дуже слабкий струм спричинює поворот рамки. Обмотку рухомої частини роблять безкаркасною, оскільки алюмінієвий каркас створював би надто великий момент заспокоєння, значно більший, ніж обертаючий або протидіючий, а від цього процес установаження рухомої системи відбувався б дуже повільно.

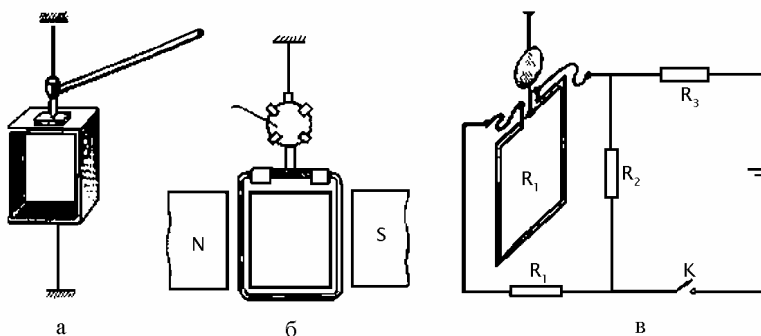


Рис. 61. Рухомі системи приладів високої чутливості:
а – на розтяжках із стрілковим відліком; б – на підвісі із дзеркальним відліком; в – створення моменту заспокоєння

Момент заспокоєння в гальванометрах створюється так. Під час руху рамки в магнітному полі в ній індукується е. р. с., а оскільки при вимірюваннях коло гальванометра виявляється замкненим (рис. 61, в), то в ньому під дією цієї е.р.с. протікає струм. Проходячи через рамку, цей струм взаємодіє з магнітним полем магніту. За правилом Ленца, сили взаємодії спрямовані назустріч напрямку руху рамки, тобто гасять коливання рухомої системи. Сила цього струму, а отже, і величина моменту, що гасить коливання, залежать від опору кола. Можна підібрати опір кола таким, щоб час заспокоєння був найменший. Такий опір називають зовнішнім критичним опором гальванометра, а сам

гальванометр, замкнений на такий опір, – критично заспокоєним. Якщо гальванометр замикається на опір, більший або менший від критичного, час заспокоєння збільшується, оскільки в першому випадку встановлення приладу має коливальний характер, а в другому він хоч і аперіодичний, але рамка до положення рівноваги підходить дуже повільно.

Вибираючи гальванометр, треба прагнути, щоб він працював в умовах, близьких до критичного заспокоєння.

5. Вимірювання струмів, напруги, потужності і електричної енергії. Для вимірювання струму 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 2 порядки) за опір елемента вітки, у котрій вимірюється струм.

Для вимірювання напруги вольтметр вмикають паралельно до елемента, напругу на якому треба визначити. У колах постійного струму використовуються прилади магнітоелектричної системи. Для зменшення похибки вимірювання опір вольтметра повинен бути великим (на 2 порядки більшим за опір елемента, на якому вимірюється напруга).

При вимірюванні малих постійних напруг застосовують магнітоелектричні гальванометри. Більш точні результати при вимірюванні напруги в діапазоні 1–1000 мкВ отримують за допомогою потенціометрів постійного струму і цифрових мікрвольтметрів.

Малі змінні напруги (до одиниць вольт) вимірюють за допомогою приладів випрямної системи, аналоговими електронними вольтметрами. Більш високу точність отримують при вимірюванні напруг потенціометрами змінного струму, цифровими вольтметрами.

Для вимірювання змінних напруг від одиниць до сотень вольт використовують прилади електромагнітної, електродинамічної, і випрямної систем, потенціометри змінного струму.

Для вимірювання великих змінних напруг застосовують ті ж самі прилади, але із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги.

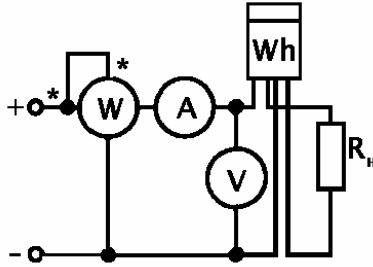


Рис. 62. Схема вмикання вимірювальних приладів в коло постійного струму

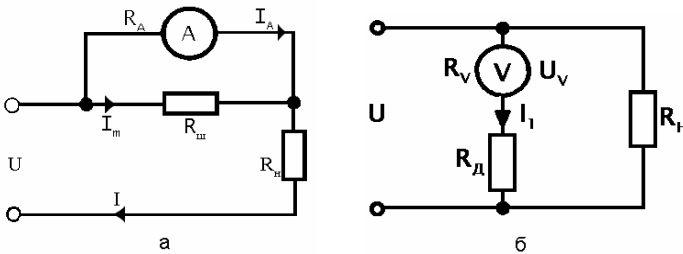


Рис. 63. Розширення меж вимірювання в колах постійного струму: а – амперметра, б – вольтметра

Потужність, що споживається з мережі електротехнічним пристроєм вимірюється ватметром.

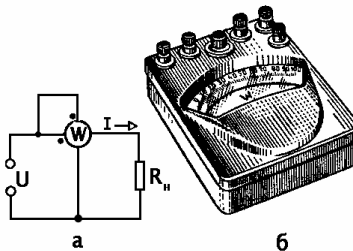


Рис. 64. Ватметр: а – схема включення; б – зовнішній вигляд

Електродинамічні ватметри працюють на підставі взаємодії двох проводів зі струмом.

Сила взаємодії двох проводів зі струмом пропорційна до добутку струмів

$$M_{\text{оберт}} = k_3 \text{ оберт } I_1 I_2 \quad (230)$$

Переваги: відносно висока точність (найбільша точність в колах змінного струму).

Для захисту від зовнішніх магнітних полів використовують подвійні екрани з феромагнітного матеріалу (пермалою).

Недоліки: збільшується власне споживання енергії, підвищується чутливість до механічних і електричних перевантажень, відносна складність і висока вартість.

Частини недоліків позбуваються, розмістивши всередині обох котушок феромагнітні осердя. Такий прилад є феродинамічним. Замість постійного магніту встановлюється електромагніт – нерухома котушка з феромагнітним осердем в якому створюється сильне магнітне поле, завдяки чому зменшується власне споживання енергії і відпадає необхідність використання магнітних екранів

Недоліки: знижується точність приладів.

Електродинамічні прилади – переносні, феродинамічні прилади – щитові.

Залежність моменту обертання від струму в котушках дозволяє використовувати електродинамічний механізм для вимірювання потужності (ватметр).

Вимірювання енергії – за допомогою лічильника електричної енергії. При рівновазі моменту обертання і моменту гальмування диск приладу обертається з постійною швидкістю:

$$M_{\text{об.}} = M_c, \quad Pt = Cnt, \quad (231) \quad (232)$$

де C – стала приладу;

n – частота обертання диску;

$Pt = W$ – енергія за час t .

$W = CN$ – кількість обертів диску для вимірювання енергії. У лічильниках використовується індукційний вимірювальний механізм, в якому є підраховуючий механізм.

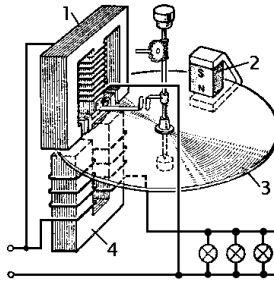


Рис. 65. Індукційний вимірювальний механізм:

1 – паралельний електромагніт (напруги); 2 – постійний магніт;
3 – алюмінієвий диск; 4 – послідовний електромагніт (струмовий)

6. Розширення границь вимірів. Для вимірювання великих змінних струмів і великих змінних напруг користаються допоміжними приладами – вимірювальними трансформаторами. Великі струми і напруги підводяться до первинних обмоток цих трансформаторів. До вторинних обмоток підключаються вимірювальні прилади.

Вимірювальні трансформатори дозволяють розширити границі виміру приладів, які застосовуються, і забезпечити належним чином їхню електричну ізоляцію від високої напруги.

Трансформатори струмів поділяються на п'ять класів точності відповідно до величини допустимої похибки. Номінальний струм у вторинній обмотці здебільшого дорівнює 5 А. У зв'язку з цим вимірювальні прилади, що включаються через трансформатор струму, розраховуються на струм у 5 А. На шкалах приладів, призначених для вмикання з вимірювальним трансформатором, мають написи у вигляді дроби, чисельник якого відповідає номінальному струму первинної обмотки, а знаменник – струму вторинної обмотки.

Трансформатори напруги поділяються на три класи точності. Відповідно до прийнятого стандарту напруга у вторинній обмотці повинна бути 100 В.

Вимірювальні прилади, що підключаються до трансформаторів напруги, розраховуються звичайно на 130–140 В. На шкалах таких приладів також є позначення у вигляді дроби. У чисельнику дроби зазначена первинна, а в знаменнику – вторинна напруга вимірювального трансформатора. Це позначення має приблизно такий вигляд:

$$C_{\text{тр}} \frac{6000}{100} \text{ В.} \quad (233)$$

Непрямі вимірювання безпосередньо вимірювальної величини не дають, її знаходять розрахунком, використовуючи результат прямих вимірювань допоміжних величин, з якими величина, що визначається, пов'язана відомою залежністю. Наприклад, $P=UI$.

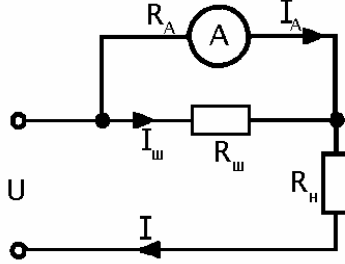


Рис. 66. Схема вмикання шунта

Для розширення меж вимірювання амперметра використовують шунти.

Схема вмикання шунта для розширення меж вимірювання амперметра. Для розширення меж вимірювання вольтметра використовують додаткові опори, котрі вмикаються послідовно з обмоткою вольтметра.

Величину додаткового опору можна визначити з формули

$$R_d = R_v (m - 1),$$

де $m = \frac{U}{U_v}$ – коефіцієнт розширення меж вимірювання;

U_v – максимально допустима напруга вольтметра, В.

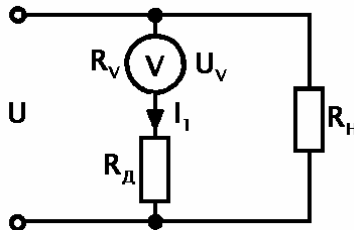


Рис. 67. Схема вмикання вольтметра з додатковим опором

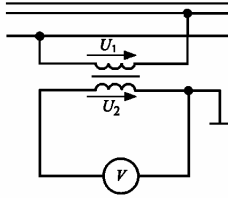


Рис.68. Схема вмикання трансформатора напруги

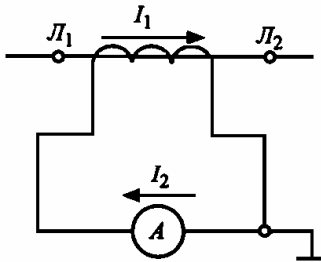


Рис.69. Схема вмикання трансформатора струму

Для дистанційного вимірювання багатьох неелектричних величин (температура, тиск, вологість, рівень) і використання пропорційних ним сигналів для автоматичного керування доцільно перетворювати неелектричні величини в електричні (напруга, струм, опір). Для перетворення неелектричних величин в електричні використовують електричні пристрої – датчики.

Для вимірювання опорів використовують різні методи залежно від характеру об'єкта, умов використання (тверді або рідинні провідники, заземлювачі, електроізоляція), від вимог до точності і швидкості вимірювань, від величини вимірювальних опорів. Методи вимірювання малих опорів відрізняються від вимірювання великих опорів.

Для прямого вимірювання використовують магнітоелектричні вимірювальні прилади одно- та дворами. Кут відхилення стрілки приладу при постійній напрузі залежить тільки від величини вимірювального опору:

$$\alpha = \frac{U \times S_{IT}}{R_B + R_D + R_X}, \quad (234)$$

де R_B – вимірювальний опір
 R_D – додатковий опір
 R_X – опір вимірювача
 Якщо шкалу приладу проградувати по цьому виразу в одиницях опору, то отримаємо прилад – омметр.

Прямі

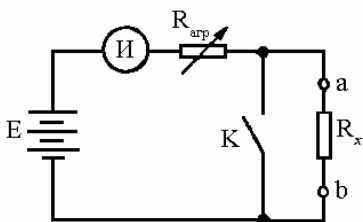


Рис. 70. Принципіальна схема омметра

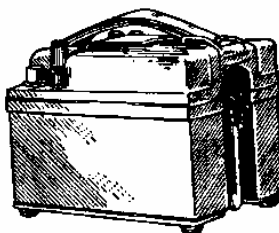
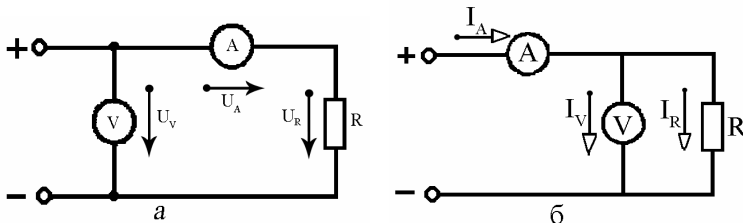


Рис. 71. Зовнішній вигляд мегаомметра



*Рис. 72. Схеми вимірювання опорів з допомогою амперметра і вольтметра:
 а – великих опорів; б – малих опорів*

Помилки від непостійності напруги джерела не виникатиме, якщо вимірювальний прилад матиме 2 обмотки, які розташовані на спільній вісі під певним кутом.

У дворамному вимірювальному приладі – логометрі відсутні протидіючі пружини. Тому при відсутності струму рухома частина приладу знаходиться в рівновазі. Положення стрілки на шкалі залежить від співвідношення струму в обмотках, але не залежить від напруги джерела.

Враховуючи, що струм у колі однієї з котушок логметра залежить від значення R_x , шкалу градуюють в одиницях опору і тоді це буде прилад – омметр.

Омметри для вимірювання опору ізоляції постачають з джерелом живлення напругою до 1000 В, щоб виміри проводити при напрузі приладу рівній напрузі установки.

Омметри, розраховані на вимірювання великих опорів (більше 1 МОм) називають мегомметрами.

Непрямі методи вимірювань:

1. При постійному струмі – за показниками амперметра і вольтметра.

2. Малі і середні опори вимірюють методом співставлення вимірювального опору зі зразковим опором.

3. Середні і великі опори вимірюють методом заміщення.

При вимірюванні великих опорів амперметра замінюють гальванометром, чим збільшують точність вимірювань.

Найбільш точні виміри дає використання мостової схеми.

Методи порівняння

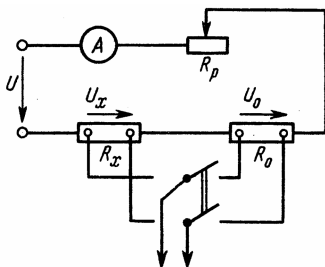


Рис. 73. Вимірювання опорів за допомогою зразкового опору

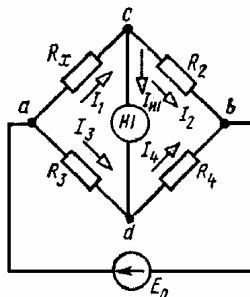


Рис. 74. Вимірювання опорів за допомогою одинарного вимірювального моста

7. Вимірювання неелектричних величин електричними методами. Для автоматичного керування виробничими процесами та їх автоматичного регулювання потрібен безперервний контроль цих процесів. Це значить, що в будь-який момент часу треба мати дані про основні величини, характерні для того чи іншого процесу.

Так, для автоматичного керування каландром, який виготовляє тонку листову гуму чи пластик, потрібно весь час вимірювати товщину листа, що виходить з нього, а також температуру валків. Для автоматичного керування котельною треба знати в кожний момент тиск пари, рівень води в котлі, температуру відхідних газів тощо.

Вимірювати ці величини можна різними приладами, але електричні методи вимірювань є найдосконалішими. Їх можна використати для вимірювання механічних зусиль, температури, тиску, лінійних величин, швидкості, ступеня вологості та багатьох інших величин.

Переваги цих методів такі:

1. Автоматичність вимірювань і постійна готовність апаратури до дії.
2. Передавання показів на великі відстані.
3. Можливість точного вимірювання величини, що швидко змінюється.
4. Широкий діапазон вимірювань.
5. Можливість запису значень вимірюваної величини самописними приладами.

Схема для вимірювання неелектричної величини електричним методом складається з таких елементів:

1. *Датчика* – приладу для перетворення неелектричної величини (зусилля, тиску, швидкості тощо) в електричну (струм, опір, напругу та ін.).

2. *Підсилювача* – приладу, що підсилює надто слабкі для безпосереднього вимірювання електричні величини, які надходять від датчика.

3. *Перетворювача* – приладу для перетворення одної електричної величини в іншу (випрямляч змінного струму та ін.).

4. *Вимірювального приладу*, який використовується для безпосереднього відліку неелектричної величини і градується в її одиницях (градусах, м/с тощо).

Простіші схеми містять лише деякі з перелічених елементів.

Одну й ту саму неелектричну величину можна вимірювати за допомогою датчиків, які працюють на різних принципах. Наприклад, товщину стрічки можна виміряти, користуючись індуктивним, ємнісним або ізогпним датчиком. Водночас різні неелектричні величини можна вимірювати однотипними датчиками.

Існує значна кількість датчиків різних типів (індуктивні, магнітоелектричні, поплавкові, термоелектричні, датчики опору та ін.).

Як приклад розглянемо схему установки для вимірювання рівня рідини з датчиком опору (рис. 75).

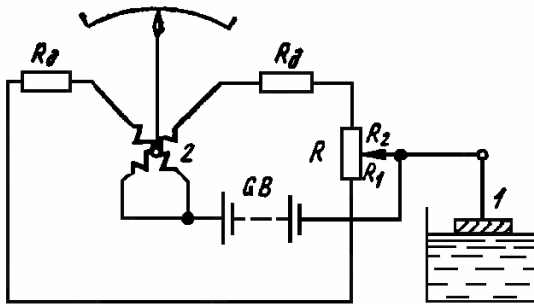


Рис. 75. Схема установки для вимірювання рівня рідини

Установка складається з поплавка 1 , датчика опору (реостата) R і логометра. Плечі R_1 і R_2 реостата ввімкнено послідовно з котушками логометра. Установка працює так. При зміні рівня рідини повзунок реостата переміщується, змінюючи значення R_1 і R_2 . Внаслідок цього змінюється сила струмів у котушках логометра, ввімкнених через додаткові резистори R_0 , і відхиляється рухома частина логометра. Шкала останнього градується в значеннях рівня рідини.

Як бачимо, в цьому випадку використано тільки два елементи схеми для вимірювання неелектричних величин: датчик і вимірювальний прилад.

Контрольні запитання

1. Як здійснюється заспокоєння рухомої частини приладів магнітоелектричної системи?
2. Чому у ватметрах не використовують механізми магнітоелектричної, електромагнітної і електростатичної систем?
3. Як утворюється обертаючий момент у приладах індукційної системи?
4. Чим відрізняється логометр від інших вимірювальних приладів?
5. Чому з гальванометром зручно працювати тоді, коли він замкнутий на опір близький, до критичного.

1.8. ТРАНСФОРМАТОРИ

1. Принцип дії та будова трансформатора.
2. Параметри, які характеризують роботу трансформатора: е.р.с. обмоток, коефіцієнт трансформації.
3. Режими роботи трансформатора.
4. Втрати енергії в трансформаторі.
5. Трифазні та спеціальні трансформатори: зварювальні, вимірювальні струму і напруги, автотрансформатори, поворотні.
6. Котушки запалювання з розімкнутим і замкнутим магнітопроводами систем запалювання автомобілів.

1. Принцип дії та будова трансформатора. Трансформатор – статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги при незмінній частоті.

За допомогою трансформаторів можна здійснювати передачу електричної енергії на великі відстані при високих напругах (до 500 кВ і більше) і відносно малих струмах, зниження струму при заданій потужності (забезпечує зниження втрат напруги і потужності, збільшується економічність ліній електропередач).

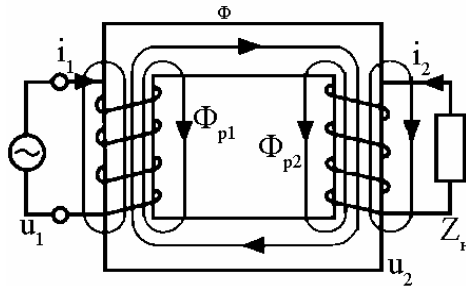


Рис. 76. Будова двообмоткового трансформатора

Однофазний трансформатор складається з двох обмоток (первинної і вторинної) з числом витків w_1 і w_2 . До первинної з числом витків w_1 обмотки підводиться напруга мережі, до вторинної обмотки під'єднуються споживачі електричної енергії.

Обидві обмотки намотуються на магнітопровід, який призначений для підсилення електромагнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками трансформатора. Для зменшення втрат на

вихрові струми магнітопровід трансформатора набирають із тонких (ізольованих одна від одної тонким папером, лаком або окалиною) листів слабовуглицевої сталі (електротехнічної).

Одна з обмоток трансформатора, яка розрахована на більшу напругу, називається обмоткою вищої напруги, інша – обмоткою нижчої напруги.

Принцип дії: при підключенні трансформатора до мережі змінного струму з напругою U_1 в первинній обмотці проходить струм i_1 . Під дією намагнічувальної сили збуджується змінний в часі магнітний потік.

В основу роботи трансформатора покладено закон електромагнітної індукції, у відповідності з яким пронизуючий обмотки трансформатора основний магнітний потік індуктує в них е.р.с. e_1 і e_2 , якщо до вторинної обмотки під'єднати споживача електричної енергії (навантаження), то під дією е.р.с. e_2 по цій обмотці протікатиме змінний струм i_2 . Так здійснюється (за допомогою змінного магнітного потоку) передача енергії з первинної обмотки у вторинну.

2. Параметри, які характеризують роботу трансформатора: е.р.с. обмоток, коефіцієнт трансформації.

Основний магнітний потік індуктує ЕРС у первинній та вторинній обмотках:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (235) \quad (236)$$

Ці е.р.с. збігаються за фазою та відстають від потоку на $\pi/2$.

Діючи значення е.р.с. можна визначити за рівнянням трансформаторної е.р.с., тобто:

$$E_1 = 4,44\Phi_m f w_1; \quad E_2 = 4,44\Phi_m f w_2.$$

ККД трансформатора дуже великий, тому з достатньою точністю можна вважати, що

$$E_1 \approx U_1; \quad E_2 \approx U_2; \quad I_1 U_1 = I_2 U_2.$$

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.

Коефіцієнт трансформації для знижуючого трансформатора:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (237)$$

Із цього випливає, що трансформатор підвищує напругу і разом із тим знижує струм (та навпаки).

Коефіцієнт трансформації – відношення е.р.с. обмотки вищої напруги до е.р.с. обмотки нижчої напруги

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44fw_1\Phi_M}{4,44fw_2\Phi_M} = \frac{w_1}{w_2}; \quad (238) \quad K = \frac{U_1}{U_{2x}}. \quad (239)$$

3. Режим роботи трансформатора.

Номинальний режим – робота трансформатора в умовах для яких він розрахований і виготовлений. Характеризується номінальними напругою, струмом і потужністю. Ці дані розташовані на щитках трансформатора.

Режим холостого ходу – до первинної обмотки підводиться номінальна напруга, а вторинна обмотка розімкнена (відсутнє навантаження).

Потужність, яка споживається трансформатором із мережі при холостому ході (у зв'язку з малими втратами на первинній обмотці) дорівнює втратам в сталі магнітопроводу.

$P_x = P_c + I_{1r}^2 \approx P_c$ – електрична енергія через трансформатор (240) не передається.

Режим короткого замикання – одна з обмоток трансформатора отримує живлення від джерела зі змінною напругою, а затискачі вторинної обмотки замкнені на коротко.

Коротке замикання може бути експлуатаційним і випробувальним.

Випробувальне коротке замикання проводиться для визначення напруги замкнення, втрат в обмотках.

Здійснюється за допомогою регулятора напруги: плавно збільшують напругу від нуля до значення при якому струм в обмотках дорівнює номінальному значенню.

Експлуатаційне коротке замикання виникає при аварійних режимах.

Напруга короткого замикання

$$U_k = \frac{U_{1k}}{U_{1H}} \times 100\%. \quad (241)$$

Напруга короткого замикання (5–10% U_n) – вказується на щиті трансформатора.

Паралельна робота трансформаторів: на підстанціях в години малого навантаження вмикається частина трансформаторів, а в години великого навантаження – всі трансформатори на паралельну роботу.

Таким чином зменшуються втрати енергії і збільшується коефіцієнт корисної дії підстанції, одночасно збільшуючи надійність системи розподілу електричної енергії.

Первинні обмотки під'єднують в спільну первинну мережу, вторинні – у спільну вторинну мережу.

Для вмикання на паралельну роботу необхідно виконати такі умови:

- рівність коефіцієнтів трансформації $K_1=K_2=K_n$;
- однакова первинна напруга;
- рівність напруги короткого замикання трансформаторів $U_{1k}=U_{2k}=\dots=U_{nk}$.

4. Втрати енергії в трансформаторі.

Потужність, що споживається трансформатором, –

$$P_1=U_1I_1\cos\phi_1, \quad P_2=U_2I_2\cos\phi_2,$$

ККД трансформатора визначається співвідношенням

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_1} \quad (242)$$

Рівняння балансу активних потужностей має вигляд:

$$P_1=P_2 + P_M + P_e, \quad (243)$$

де P_M – магнітні втрати (втрати у сталі);

P_e – електричні втрати (втрати у міді) тобто:

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_e}.$$

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:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}. \quad (244)$$

Магнітні втрати визначаються експериментально або обчислюються за імпіричними залежностями, наприклад:

$$P_M = P_{1,0/400} \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} G_M, \quad (245)$$

де $P_{1/400}$ – втрати у 1 кг сталі при індукції $B_m = 1$ Тл та частоті $f=400$ Гц, G_M – маса осердя.

Електричні втрати – це втрати в міді обмоток, тобто:

$$P_e = R_1(t^\circ) I_1^2 + R_2(t^\circ) I_2^2 \quad (246)$$

При визначенні втрат враховуються зміни активного опору обмоток від нагріву. Електричні втрати прямо пропорційні квадрату струму, тобто:

$$P_e = f(\beta) = f(I_2/I_{2н}). \quad (247)$$

Тому електричні втрати називають втратами змінними.

5. Трифазні та спеціальні трансформатори: зварювальні, вимірювальні струму і напруги, автотрансформатори, поворотні.

Силкові трансформатори – ті, які використовують в електротехнічних системах.

Трансформатори спеціального призначення: зварювальні, електричні, випробувальні, імпульсні, високочастотні, для випрямляючих установок, перетворювачі частоти. Для вмикання в схеми вимірювальних приладів використовують вимірювальні трансформатори.

Для регулювання напруги в невеликих межах і для пуску двигунів змінного струму великої потужності використовують автотрансформатори.

В автотрансформаторах між первинною і вторинною обмотками існує не тільки магнітний, а й електричний зв'язок.

Автотрансформатори малої потужності (0,5–7,5 кВа) з плавним регулюванням напруги широко використовують в лабораторіях. Їхній *недолік*: наявність електричного зв'язку між первинною і вторинною мережами дає можливість попадання високої напруги в коло низької напруги. *Переваги*: зменшуються втрати на нагрів і збільшується коефіцієнт корисної дії.

В електронних системах широко використовують трансформатори малої потужності (10–60 ВА) з декількома вторинними обмотками для живлення ізольованих одне від одного кіл, які мають різні номінальні напруги.

Вимірювальні трансформатори використовуються для розширення меж вимірювань вимірювальних приладів змінного струму, а також для ізоляції цих приладів від кола високої напруги. Це трансформатори струму і напруги.

Зварювальні трансформатори використовуються для електродугового зварювання. Регулювання зварювального струму може здійснюватись перемиканням секцій обмоток трансформатора або зміненням індуктивного опору дроселя, який залежить від величини повітряного зазору. При цьому зі збільшенням повітряного зазору в магнітопроводі дроселя, опір що індукується зменшується, зварювальний струм збільшується.

Трифазний струм можна трансформувати трьома однофазними або одним трифазним трансформатором.

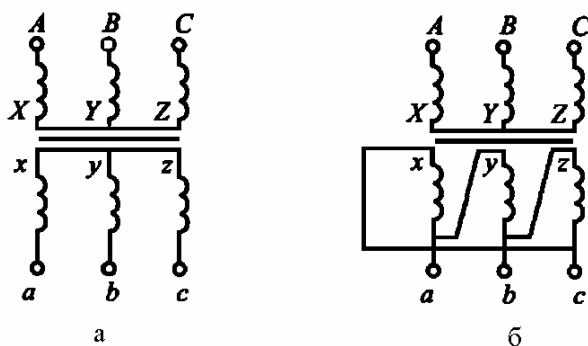


Рис. 77. Схематичне зображення трифазних трансформаторів, що з'єднані: а – зірка-зірка; б – зірка-трикутник

Поняття про поворотні трансформатори. Поворотним *обертотним*) трансформатором називається індукційна мікромашина змінного струму, призначена для одержання вихідної (вторинної) напруги, амплітуда і фаза якого відносно вхідної (первинної) напруги функціонально залежать від кута повороту ротора. Поворотні трансформатори дозволяють вирішувати багато алгебраїчних, геометричних і тригонометричних задач, пов'язаних з побудовою трикутників, пере-

творенням координат, розкладанням і побудовою векторів, а також можуть виконувати функції сельсинів. Тому вони широко застосовуються у лічильно-обчислювальних пристроях, у різних схемах автоматики й у системах автоматичного регулювання як вимірники неузгодженості.

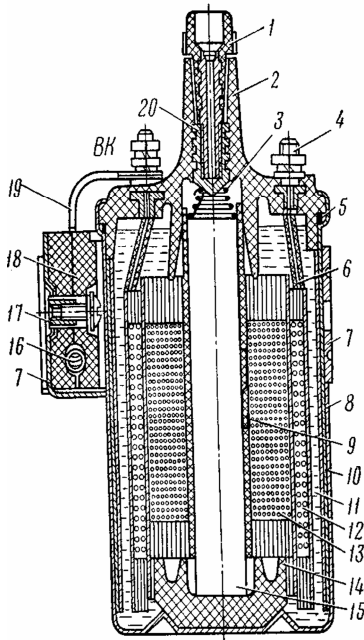
Конструктивно поворотні трансформатори незначно відрізняються від трифазного асинхронного мікродвигуна з фазним ротором. Залежно від способу з'єднання обмоток статора виготовляються і застосовуються поворотні трансформатори як з обертовим ротором, так і з ротором, що може повертатися щодо статора на деякий обмежений кут. Електричний контакт у трансформаторі з обертовим ротором здійснюється за допомогою контактних кілець і щіток, а в трансформаторі з обмеженим поворотом ротора (і вбудованим чи прибудованим для цієї мети редуктором) – за допомогою спіральних пружин. У пазах сердечників статора і ротора поворотного трансформатора розташовують по дві розподілені однофазних обмотки, зміщених у просторі один відносно іншого на кут 90^0 .

Принцип дії поворотного трансформатора заснований на явищі взаємодукції. Оскільки при повороті ротора взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора змінюється, е.р.с. у вторинних обмотках трансформатора, індуковані пульсуючим магнітним полем однофазної обмотки збудження, також будуть змінюватися у визначеній функціональній залежності від кута повороту ротора. При повороті ротора трансформатора його вихідна (вторинна) напруга змінюється за законом синуса і косинуса (при двох вихідних напругах) чи лінійно. Тому поворотні трансформатори підрозділяються на *синусно-косинусний* і *лінійний* типи.

6. Котушки запалювання з розімкнутим і замкнутим магнітопроводами систем запалювання автомобілів. На вітчизняних автомобілях установлюють 12-вольтові котушки запалювання Б7, Б5-А, Б13, Б102-Б і ін. Останні три котушки маслonaповнені. Котушки мають аналогічну конструкцію, за винятком обмотувальних показників і матеріалу для заповнення внутрішньої порожнини котушки. Сердечник 15 (рис.78) і кільцевий магнітопровід 10 виготовлені з листів електротехнічної сталі, на поверхні яких є шар окалини, що зменшує вихрові струми. З цією ж метою кільцевий магнітопровід, зібраний із двох тонкостінних циліндрів, має розріз уздовж вісі.

Вторинна обмотка 13 намотана на втулку з електротехнічного картону. Початок обмотки з'єднаний провідником 9 із пружиною 3, а

через неї латунною вставкою 20, другий її кінець з'єднаний з одним з кінців первинної обмотки 12. Таке з'єднання обмоток (автотрансформаторний зв'язок) спрощує виготовлення котушки і сприяє зростанню високої напруги на величину е.р.с. самоіндукції первинної обмотки. Вторинна обмотка котушок намотана проводом ПЕЛІ діаметром від 0,07 до 0,1 мм із числом витків від 17 500 до 26 000.



- 1 – різьбовий вивід
- 2 – карболітова кришка
- 3 – пружина
- 4 – затискачі
- 5 – прокладка
- 6 – контактні пластини
- 7 – резистор прикріплений до скоби
- 8 – кожух
- 9 – провідник
- 10 – магнітопровід
- 11 – трансформаторне масло
- 12 – первинна обмотка
- 13 – вторинна обмотка
- 14 – порцеляновий ізолятор
- 15 – сердечник
- 16 – додатковий резистор
- 17 – різьбова втулка
- 18 – ізолятор
- 19 – шина
- 20 – латунна вставка

Рис. 78. Котушка запалювання А-Б13

З метою попередження пробую ізоляції обмотки, особливо в кінцевих і початкових рядах, де потенціал досягає найбільшої величини, перші й останні вісім рядів ізолювані один від одного чотирма–шістьма шарами конденсаторного папера; всі інші ряди ізолювані двома шарами паперу. Крім того, витки перших і останніх чотирьох рядів намотують не впритул одне до одного, а з проміжком 1–2 мм. Зверху обмотку ізолюють декількома шарами лакотканини, а потім кабельним папером.

Первинну обмотку 12 намотують поверх вторинної, що полегшує відвід тепла від обмотки до кожуха під час роботи котушки. Первинна обмотка котушок виконана проводом ПЕЛ діаметром 0,72–0,86 мм із числом витків від 270 до 330. Між кожним рядом обмотки прокладають кілька шарів кабельного паперу. Кінці первинної обмотки припаяні до затискачів 4 і ВК. На вивідні кінці надіті трубки 6 з ізоляційного матеріалу.

Порцеляновий ізолятор 14 попереджає можливість виникнення розряду високої напруги між осердям і кожухом 8 котушки. Для поліпшення ізоляції первинну і вторинну обмотки котушок просочують трансформаторним маслом 11. Усі порожні місця в котушках заливають трансформаторним маслом, що значно поліпшує ізоляцію обмоток і відведення тепла від обмоток на корпус. Рівень масла під час вертикального положення котушок при $+20^{\circ}\text{C}$ повинен бути вище торців обмоток на 3–5 мм, що дає можливість деякого збільшення об'єму масла при нагріванні.

Герметичність кріплення карболітової кришки 2 у кожусі забезпечується прокладкою 5 з маслобензостійкої гуми. Додатковий резистор 16 складається з дрової спіралі, двох керамічних тримачів 15, гвинта і різьбової втулки 17. Резистор прикріплений до скоби 7. Кінці спіралі резистора приварюють до шин 19 точковим зварюванням. Шини з'єднані із затискачами ВК і ВКБ котушки. Різьбовий вивід 1, призначений для надійного кріплення високовольтного проводу, вгвинчують у латунну вставку кришки.

Заповнення котушок трансформаторним маслом при одночасному збільшенні кількості витків вторинної обмотки дозволяє підвищити напругу, що забезпечує безперебійне запалювання у високооборотних двигунах з підвищеним ступенем стиску навіть при збільшенні зазору між електродами свіч до 1 мм.

У котушці запалювання Б13 первинна обмотка має 270 витків ПЕЛ, $\varnothing 0,72$ мм, $R = 1,5 \text{ Ом}$, Вторинна обмотка має 26000 витків ПЕЛ, $\varnothing 0,07$ мм, $R = 10\,000 \text{ Ом}$. Додатковий резистор-константан, $R = 1,85 \text{ Ом}$.

Провідники низької напруги закріплюються в затискних пристроях 7 і своїми торцями стикаються з контактними пластинами б виводів первинної обмотки. Провідник високої напруги вводиться всередину штуцера 3 і підгортається гайкою 1. Жила цього провідника вводиться усередину латунної втулки карболітової кришки 2.

Додатковий резистор у колі первинної обмотки встановлюється окремо від котушки. Первинна обмотка має 290 витків, $R = 1,2 \text{ Ом}$, вторинна – 18000 витків, $R = 7000 \text{ Ом}$.

Контрольні запитання

1. Від чого залежить коефіцієнт трансформації трансформатора і як це пояснити?
2. Що може трансформувати трансформатор?
3. Яке призначення масла в баці потужного силового трансформатора?
4. Для чого застосовують автотрансформатори?

1.9. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Машини постійного струму, будова і принцип дії.
2. Зворотність електричних машин постійного струму.
3. Характеристики генераторів постійного струму.
4. Способи пуску в хід та регулювання частоти обертання якоря двигуна постійного струму.

1. Машини постійного струму, будова і принцип дії.

Електричні машини постійного струму (двигуни і генератори) широко застосовуються в різних галузях техніки. Основна перевага двигунів постійного струму полягає в можливості плавного регулювання частоти обертання й одержання великих пускових моментів. З цієї причини двигуни постійного струму широко використовують як тягові двигуни на електричному транспорті, а також для приводу різного технологічного устаткування.

Електричні машини постійного струму малої потужності застосовуються в системах автоматичного регулювання, де вони використовуються не тільки для приводу виконавчих механізмів, але і як датчики частоти обертання рухомих частин регульованої системи.

Генератори постійного струму застосовуються в системах електроживлення спеціального устаткування, наприклад, у радіотехнічних установках, при зарядці акумуляторів, для живлення електролітичних ванн тощо.

Загальним недоліком електричних машин постійного струму є їхня конструктивна складність, пов'язана в основному з щітково-колекторним апаратом. Крім того, в колекторно-щітковому апараті, що здійснює постійну перекомутацію ланцюгів електричної машини, виникає іскріння. Це знижує надійність машин і обмежує сферу їхнього застосування. Істотним недоліком застосування двигунів постійного струму є необхідність попереднього перетворення для них

електричної енергії змінного струму в електричну енергію постійного струму.

Будова машини постійного струму. Машина постійного струму в основному складається з нерухокої частини, що служить для збудження головного магнітного поля, і обертової частини, в якій індукуються е.р.с. Струми від цієї е.р.с, взаємодіючи з головним магнітним полем, створюють гальмівний момент у генераторному режимі й обертаючий момент у двигунному.

Нерухома частина складається зі станини (рис.79), на якій закріплюються основні (головні) полюси для збудження головного магнітного потоку і додаткові – для поліпшення комутації у машині.

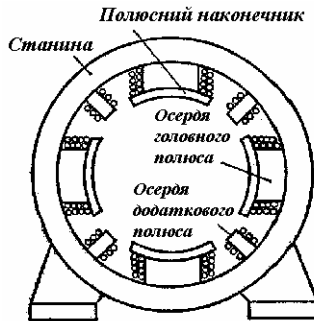


Рис. 79. Будова машини постійного струму

Головний полюс складається із осердя полюса, набраного з листової сталі й укріпленого болтами на станині, і котушки обмотки збудження. Осердя на вільному кінці забезпечується полюсним наконечником для створення необхідного розподілу магнітної індукції уздовж кола якоря.

Станина є ярмом машини, тобто частиною, що замикає магнітне коло головного потоку Φ (рис.80). Вона виготовляється з литої сталі, тому що магнітний потік у ній відносно постійний. Додаткові полюси встановлюються на станині між основними. На осердях додаткових полюсів розташовуються обмотки, що з'єднуються послідовно з якорем.

Якорем називають частину машини, в обмотці якої при обертанні її щодо головного магнітного поля індукуються е.р.с. У машині постійного струму якорь складається з зубчастого осердя, обмотки, вкладеної в його пазах, і колектора, насадженого на вал якоря. Осердя

якоря набирається з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, ізолюваних один від одного лаком.

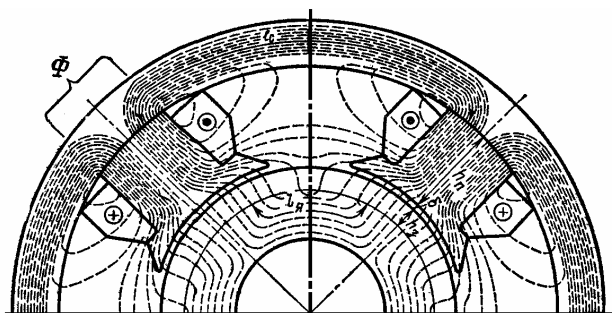


Рис.80. Розподіл магнітних потоків у машині постійного струму

У пази осердя якоря вкрито обмотку якоря, яка звичайно складається з окремих секцій. Для відводу струму від колектора служать щітки, встановлені в щіткотримачах. Щітку 1 (рис.82) до колектора притискає пружина 2. Струм від щітки відводиться спеціальним гнучким кабелем. Щіткотримачі надіваються на щіткову траверсу (отвір 3), від якої вони електрично ізолюються. Траверсу кріплять співвісно з якорем так, що її можна повертати, змінюючи положення щіток відносно полюсів машини.

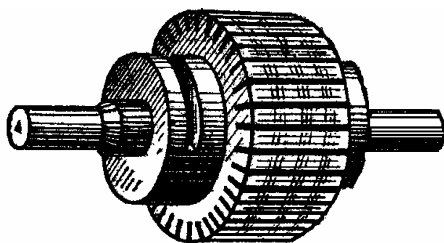


Рис.81. Осердя якоря

Характерною частиною електричних машин постійного струму є *колектор*. Це порожній циліндр, зібраний з ізолюваних один від одного клинчастих мідних пластин 1 (рис.83). Пластини колектора ізолювані також від вала машини. Провідниками 2 вони з'єднуються з витками обмотки, розміщеної в пазах якоря. Обертова обмотка

з'єднується з зовнішнім ланцюгом ковзним контактом між щітками і колектором.

2. Зворотність електричних машин постійного струму.

Як і всі електричні машини, машина постійного струму має зворотню дію. Вона працює в режимі генератора, якщо її обертає первинний двигун, головне магнітне поле збуджене, а ланцюг якоря з'єднаний через щітки з приймачем. За таких умов е.р.с., яка індукується в обмотці якоря, створює в якорі і приймачі струм.

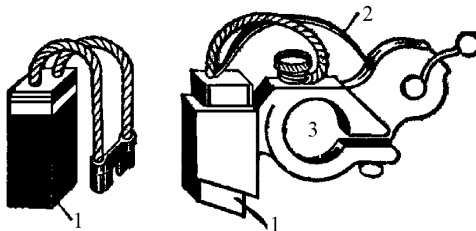


Рис.82. Будова щіток і щіткотримача:

1 – щітки, 2 – пружина, 3 – отвір для щіткової траверси

Взаємодія струму якоря з головним магнітним полем створює на валу машини гальмівний момент, що переборюється первинним двигуном. Генератор перетворює механічну енергію в електричну.

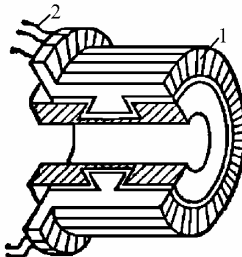


Рис.83. Будова колектора:

1 – мідні пластини; 2 – провідники

У двигунному режимі кола якоря і збудження машини приєднані до джерела електроенергії. Взаємодія струму якоря з головним магнітним полем створює обертаючий момент. Під дією

останнього обертовий якір переборює момент навантаження на валу машини. Двигун перетворює електричну енергію в механічну.

Таким чином, та сама машина може бути використана як генератор чи двигун. Найважливішою класифікаційною ознакою машин постійного струму є спосіб збудження головного магнітного поля. Одне з них є використання постійних магнітів на полюсах машини. У багатьох сучасних машинах головне магнітне поле збуджується за допомогою електромагнітів. Для цього використовується обмотка збудження зі струмом збудження, розміщена на осердях полюсів машини. Усі робочі характеристики машин постійного струму під час роботи як у режимі генератора так і в режимі двигуна залежать від способу вмикання кола збудження стосовно кола якоря. З'єднання цих кіл може бути паралельним, послідовним, змішаним, і, нарешті, ці кола можуть бути незалежні один від одного, у відповідності з чим прийнято розрізняти паралельне, послідовне, змішане і незалежне збудження машин. Практично дуже важлива та обставина, що потужність кола збудження при будь-якому способі вмикання обмотки збудження відносно мала – приблизно 5% номінальної потужності в малих машинах і менш 1% – у машинах великої потужності. Це уможливує економічне керування роботою машини постійного струму (напругою генератора, кутовою швидкістю обертання двигуна).

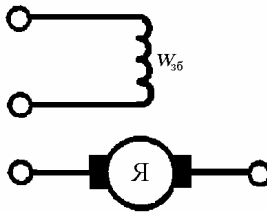


Рис.84. Машина з незалежним збудженням

У машинах з незалежним збудженням обмотка збудження підключається до незалежного джерела електроенергії (рис.84), завдяки чому струм у ній не залежить від напруги на виводах якоря машини. Переріз проводів обмотки збудження в цих машинах вибирається залежно від напруги джерела струму збудження. Характерним для цих машин є незалежність головного магнітного потоку від навантаження машини.

У машин з паралельним збудженням кола обмотки збудження з'єднується паралельно з колом якоря (рис. 85, а). У цьому випадку струм збудження в багато разів менший від струму якоря $(0,05-0,01) \cdot I_{\text{я}}$, а напруга U між виводами кіл якоря і збудження та сама. Отже, опір обмотки збудження ($r_3 = U/I_3$) повинен бути відносно великим. Обмотка збудження машини паралельного збудження має велику кількість витків $w_{\text{пар}}$ з тонкого проводу і завдяки цьому має значний опір. Характерним для машин паралельного збудження, що працюють у системі великої потужності, є сталість головного магнітного потоку і його невелика залежність від умов навантаження машини.

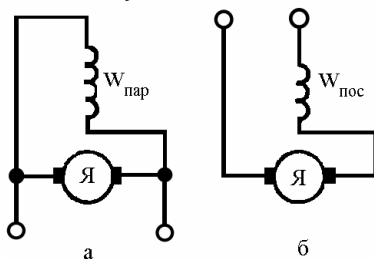


Рис. 85. Машина з паралельним та послідовним збудженням:
а – з паралельним збудженням; б – з послідовним збудженням

У машин з послідовним збудженням струм в якорі $I_{\text{я}}$ дорівнює струму обмотки збудження (рис. 85, б), тому вона виконується проводом великого перерізу. Значення струму $I_{\text{я}}$ в обмотці послідовного збудження велике, завдяки чому для одержання необхідної м.р.с. досить, щоб ця обмотка мала мале число витків $w_{\text{пос}}$. Отже, опір обмотки послідовного збудження R_3 відносно малий. Для цих машин характерні зміни в широких межах головного магнітного потоку при зміні навантаження машини внаслідок змін струму якоря, що є одночасно і струмом збудження.

У машинах зі змішаним збудженням на кожному полюсному осерді розташовані дві обмотки (рис. 86).

Одна з цих обмоток, що підключається паралельно до якоря, є основною. Створювана нею м.р.с. збуджує головне магнітне поле.

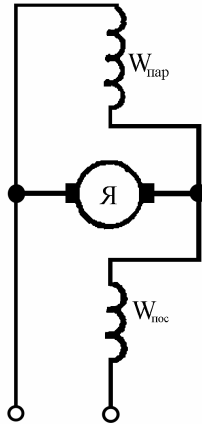


Рис.86. Машина зі змішаним збудженням

Друга обмотка $w_{\text{пос}}$ лише додатково впливає на це магнітне поле. Залежно від переваги м.р.с., створених послідовною чи паралельною обмоткою збудження, машина за своїми характеристиками може бути машиною послідовного збудження з невеликою паралельною обмоткою збудження чи машиною паралельного збудження з невеликою послідовною обмоткою збудження. У більшості машин змішаного збудження застосовується узгоджене з'єднання, тобто м.р.с. двох обмоток додаються. Зустрічне з'єднання, при якому м.р.с. обмоток мають протилежний напрямок, застосовується в деяких спеціальних випадках.

Двигуни постійного струму. Якщо обмотку збудження і якір двигуна підключити до мережі постійного струму напругою U , то виникає *електромагнітний* обертаючий момент $M_{\text{ем}}$. *Корисний* обертаючий момент M на валу двигуна менше електромагнітного на значення протидіючого моменту, створюваного в машині силами тертя і рівного моменту M_x у режимі ХХ, тобто $M = M_{\text{ем}} - M_x$.

Пусковий момент двигуна повинен бути більшим від статичного гальмового M_r у стані спокою ротора, інакше якір двигуна не почне обертатися. У сталому режимі (при $n = \text{const}$) має місце рівновага обертаючого M і гальмового M_r моментів

$$M = M_{\text{ем}} - M_x = M_r \quad (248)$$

З механіки відомо, що механічна потужність двигуна може бути виражена через обертаючий момент і кутову швидкість $W = 2\pi n/60$, як

$P=WM$. Отже, корисний обертаючий момент двигуна M (Нм), виражений через корисну потужність P (кВт) і частоту обертання n (об/хв), $M = 9550P/n$. (249)

3. Характеристики генераторів постійного струму.

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 е.р.с. якоря від струму збудження, коли вимкнуте коло навантаження, тобто

$$E=E(I), \text{ при } \omega=\text{const}$$

4. Способи пуску в хід та регулювання частоти обертання якоря двигуна постійного струму.

З рівняння електричного стану двигуна випливає, що

$$I_{\text{я}} = (U - E)/R_{\text{я}} \quad (250)$$

У робочому режимі струм якоря $I_{\text{я}}$ обмежується е.р.с. E , значення якої велике, якщо $n \approx n_{\text{ном}}$. У момент пуску $n=0$, е.р.с. $E=0$ і пусковий струм $I_{\text{п}} = U/R_{\text{я}}$ у 10–30 разів більше номінального. Тому прямий пуск двигуна, тобто безпосереднє включення якоря на напругу мережі, неприпустиме. Щоб обмежити великий пусковий струм якоря, перед пуском послідовно з якорем включається *пусковий* реостат $R_{\text{п}}$ з невеликим опором. У цьому випадку при $E=0$

$$I_{\text{п}}=U/(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})\ll U/R_{\text{я}}. \quad (251)$$

Опір реостата $R_{\text{п}}$ вибирається за припустимим струмом якоря. Звичайно $I_{\text{п}} = (2\div 2,5) I_{\text{ном}}$.

У міру розгону двигуна до номінальної частоти обертання е.р.с. E збільшується, а струм зменшується і пусковий реостат поступово і

цілком виводиться (пускові реостати розраховуються на короткочасне включення).

Регулювальний реостат $R_{\text{рег}}$ у колі збудження з відносно великим опором (десятки і сотні Ом) перед пуском двигуна цілком виводиться, щоб при пуску струм збудження і магнітний потік статора Φ були номінальними. Це приводить до збільшення пускового моменту, що забезпечує швидкий і легкий розгін двигуна.

Після пуску і розгону настає сталий режим роботи двигуна, при якому гальмівний момент на валу M_r буде зрівноважуватися моментом, що розвивається двигуном $M_{\text{ем}}$, тобто $M_{\text{ем}} = M_r$ (при $n = \text{const}$).

Електродвигуни постійного струму можуть відновлювати порушений зміною гальмівного моменту сталий режим роботи, тобто можуть розвивати обертаючий момент M , який дорівнює новому значенню гальмівного моменту M_r при відповідно новій частоті обертання n' .

Дійсно, якщо гальмівний момент навантаження M_r виявиться більше обертаючого моменту двигуна $M_{\text{ем}}$, то частота обертання якоря зменшиться. При постійних напрузі U і потоці Φ це викликає зменшення е.р.с. E якоря, збільшення струму якоря і обертаючого моменту ($M_{\text{ем}} = k\Phi/I_a$) до настання рівноваги, при якому $M_{\text{ем}} = M_r$ і $n' < n$ (252).

При зменшенні гальмівного моменту до M_r аналогічно настає новий сталий режим роботи при $M_{\text{ем}} = M_r$ і $n > n'$.

Таким чином, двигуни постійного струму мають властивість *саморегулювання* – можуть розвивати обертаючий момент, рівний гальмівному.

Частота обертання якоря двигуна постійного струму визначається на підставі рівняння електричного стану $U = E + R_a I_a$ після підстановки в нього значення е.р.с. $E = c\Phi n$. Спадання напруги в якорі $R_a I_a$ невелике: при номінальному навантаженні воно не перевищує $(0,03 \div 0,07)U_{\text{ном}}$.

Отже, частота обертання двигуна постійного струму прямо пропорційна прикладеній напрузі мережі і обернено пропорційна до магнітного потоку статора:
$$n = \frac{U - I_a R_a}{k\Phi}.$$

Регулювати частоту обертання двигуна можна двома способами: змінюючи потік статора Φ чи напругу U , які підводяться до двигуна. Регулювання частоти обертання зміною магнітного поля машини здійснюється за допомогою регулювального реостата в колі збудження двигуна. Зміна напруги, яка підводиться до двигуна, здійснюється регулюванням напруги джерела.

Можна ввести додатковий реостат у коло якоря. У цьому випадку пусковий реостат замінюється *пункторегулюючим* $R_{пр}$. Такий реостат виконує функції як пускового реостата, так і регулювального.

Регулювання частоти обертання двигуна можна здійснити, змінюючи напругу мережі, опір пункторегулюючого реостата, чи потік статора.

З рівняння обертаючого моменту двигуна $M_{см} = k\Phi I_{я}$ (253) випливає, що реверсування, тобто зміна напрямку обертання якоря, може бути здійснено зміною напрямку струму в обмотці збудження (поток Ф) чи струму якоря.

Для реверсування двигуна “на ходу” змінюють напрямок струму якоря (перемиканням якірних виводів), а обмотку збудження не переключують, тому що вона має велику індуктивність і розривання її кола зі струмом неприпустимо. Реверсування відключеного двигуна здійснюється і зміною напрямку струму в обмотці збудження (перемиканням її виводів).

Контрольні запитання

1. Який принцип дії машин постійного струму?
2. Яка будова машини постійного струму?
3. Що означає зворотність електричних машин постійного струму?
4. Способи вмикання обмоток збудження і якоря генераторів.
5. Як регулюється частота обертання якоря двигуна постійного струму?

1.10. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

1. Асинхронне і синхронне обертання магнітного поля.
2. Будова та принцип дії асинхронного двигунів.
3. Обертовий момент і його залежність від ковзання.
4. Робочі характеристики і к.к.д. асинхронного двигуна.
5. Модифікації та коротка характеристика асинхронних двигунів сільськогосподарського призначення.
6. Синхронні машини: будова та принцип дії.
7. Застосування синхронних машин у сільськогосподарському виробництві.
8. Використання електричних машин постійного і змінного струму в автотракторному електрообладнанні.

1. Асинхронне і синхронне обертання магнітного поля.

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.87). Можна розглянути моменти часу, коли фазні струми сягають максимальних значень. Із рисунка видно, що максимальний струм не збігається за напрямом із двома іншими фазними струмами.

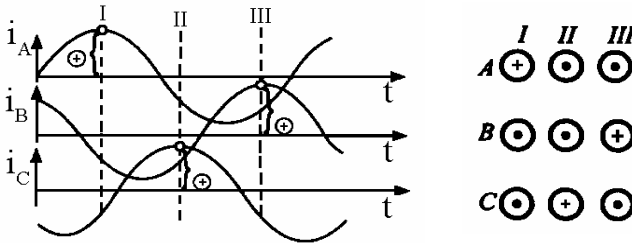


Рис.87, 88. До пояснення роботи машини змінного струму

Три котушки статорної обмотки (початки A , B , C , кінці x , y , z) розташовані під кутом 120° (рис. 88). Відповідно до таблиці на рисунку зображені напрямки струмів. Якщо об'єднати провідники з однаковим напрямком струмів, можна зобразити магнітне поле статора. Це поле буде обертатися відповідно до частоти струму, тобто

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (254)$$

Таким чином, кутова частота обертання двополюсного поля дорівнює кутовій частоті струму в обмотці статора.

Якщо у кожну фазу обмотки статора увімкнути по дві котушки (витки укладати не через 180° , а через 90° , як наведено на рис. 89), то можна одержати чотириполюсне поле. Це поле обертатиметься у два рази повільніше, тому що в 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.

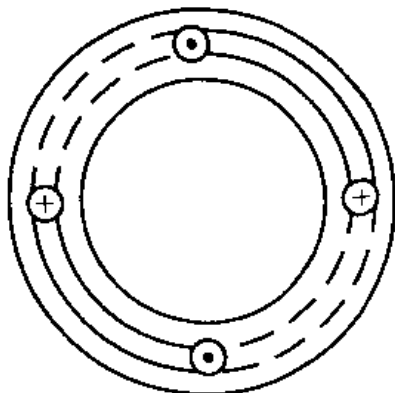


Рис.89. Чотири полюсне поле

2, 3. Будова та принцип дії асинхронних двигунів. **Обертний момент і його залежність від ковзання.**

При аналітичних дослідженнях асинхронних машин використовується *залежність електромагнітного моменту від ковзання*. Як і усі електричні машини, асинхронна машина оборотна. У режимі $0 < S < 1$ вона працює як *двигун*. За негативними визначеннями ковзання (швидкість ротора більша за швидкість обертання поля) машина працює як *генератор*. Якщо зовнішня сила обертає проти напрямку обертання поля ($S > 1$), то машина працює як *електротромагнітне гальмо*. При цьому електромагнітний момент перешкоджатиме обертанню ротора.

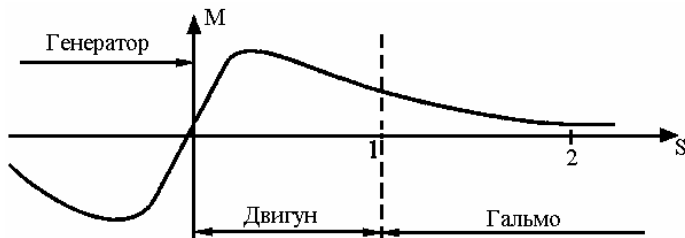


Рис.90. До пояснення режимів роботи машин змінного струму

Швидкість обертання поля визначають за такою формулою

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (255)$$

Уявимо собі обертове магнітне поле у вигляді кільця з двома постійними магнітами.

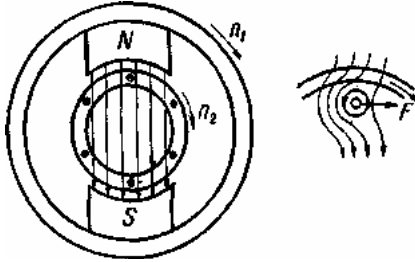


Рис. 91. Принцип дії асинхронного двигуна

У середині кільця вміщена обмотка ротора у вигляді короткозамкненого білячого колеса.

Обертове магнітне поле статора індукує у проводах обмотки ротора струми, напрямом яких визначають за напрямком правої руки. При цьому треба мати на увазі, що якщо магнітне поле обертається за годинниковою стрілкою, то відносно обертання провідника треба брати проти годинникової стрілки. У проводах, що знаходяться під північним полюсом, струм напрямлений до нас і напрям його позначимо точкою.

При взаємодії магнітного поля статора і ротора до проводу прикладена сила F яка примушує його переміщуватися в бік руху поля статора. Якщо поле статора обертається з швидкістю n_1 , яку називають *синхронною*, то ротор обертається з меншою швидкістю n_2 , яку називають *асинхронною*.

Асинхронний трифазний двигун – найпоширеніший у промисловості і сільському господарстві. Близько 95% всіх двигунів – асинхронні. Асинхронний двигун винайдений талановитим російським вченим М.О.Доліво-Добровольським у 1889 р. Простота будови, дешевизна, високий к.к.д., велика надійність у роботі сприяли його швидкому впровадженню у всі галузі господарства. Принцип дії асинхронного двигуна оснований на взаємодії обертового магнітного поля, створюваного у трифазній обмотці статора, і провідників із струмом, з яких складається обмотка ротора.

Асинхронний двигун складається з нерухокої частини – *статора* і обертової – *ротора*. Статор – сталіне осердя у вигляді порожнистого циліндра, що набирається з окремих листів електротехнічної сталі, ізолюваних між собою лаком. Всередині циліндра виштамповані пази, куди укладають обмотку статора. За будовою статор асинхронного двигуна майже нічим не відрізняється від статора синхронної машини. Обмотки статорів асинхронної і синхронної машин розраховують і виконують аналогічно.

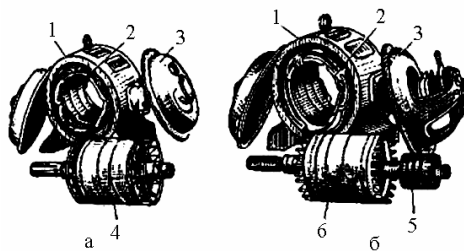


Рис. 92. Асинхронні двигуни:

а – з короткозамкненим ротором; *б* – з фазним ротором;
1 – корпус двигуна; *2* – обмотка статора; *3* – підшипниковий щит;
4 – коротко-замкнений ротор; *5* – контактні кільця;
6 – фазний ротор

Всередині статора вміщується ротор, який являє собою сталіний циліндр, що набирається з окремих листів електротехнічної сталі, покритих ізоляційним лаком.

Ротори бувають двох типів: *короткозамкнені* і *фазні*.

У пази короткозамкненого ротора укладають обмотку у вигляді білячого колеса, виконувану з мідних стержнів, які з торцевих сторін замикають кільцями (рис.93, а).

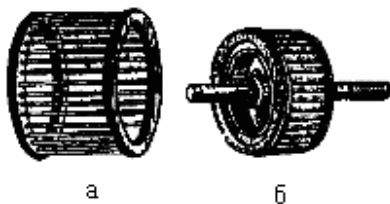


Рис. 93. Короткозамкнений ротор:
а – біляче колесо; *б* – складений

У двигунах невеликої потужності, до 100 кВт, біляче колесо виготовляють залиттям пазів ротора алюмінієм під тиском. Біляче колесо від сталі ротора не ізолюють, тому що провідність провідників обмотки в десятки разів більша від провідності сталі. При відливанні білячого колеса з алюмінію одночасно відливають і бокові кільця разом з вентиляційними крилами (рис. 94).

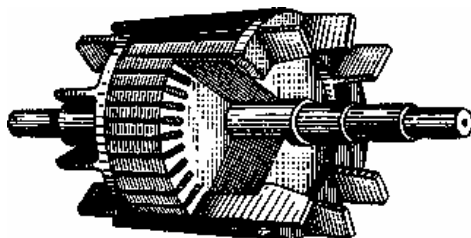
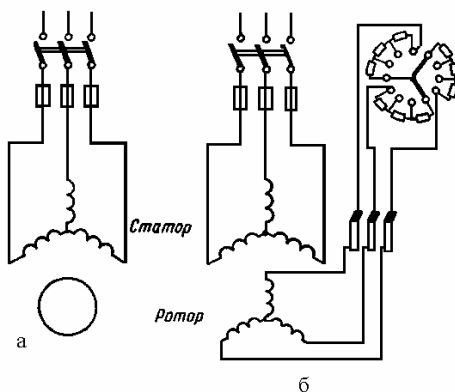


Рис. 94. Короткозамкнений ротор з алюмінієвою литою обмоткою

У пази фазного ротора укладають трифазну обмотку, виконану за типом обмотки статора. Як правило, фазну обмотку ротора з'єднують у зірку. При цьому кінці обмотки з'єднують разом, а початки приєднують до контактних кілець, на які встановлюють щітки, з'єднані з пусковим реостатом. Схеми двигунів показані на рис.95.



*Рис. 95. Схеми асинхронних двигунів:
а – з короткозамкненим ротором; б – з фазним ротором*

Виводи обмоток асинхронних двигунів позначають так:

Фази	Початки	Кінці
1	C ₁	C ₄
2	C ₂	C ₅
3	C ₃	C ₆

Обмотки двигунів можуть бути з'єднані у зірку або трикутник. Для зручності з'єднання обмоток у трикутник виводи їх приєднані до дошки затискачів за схемою, наведеною на рис.96, а. На тому самому рисунку показано способи і схеми з'єднання обмоток. Якщо на паспорті двигуна написано 220/380 В і стоїть позначення Δ/Υ, то це означає, що при лінійній напрузі в мережі 220 В обмотки треба з'єднувати в трикутник, а при лінійній напрузі 380 В – у зірку. Виводи обмоток ротора позначають буквами P₁, P₂, P₃.

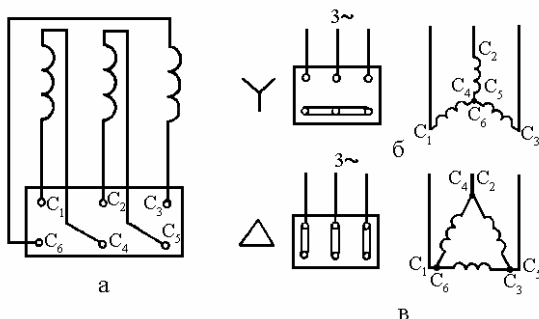


Рис. 96. Схеми з'єднання обмоток статора асинхронних двигунів:
а - приєднання виводів до дошки затискачів; б - з'єднання обмоток у зірку;
в - з'єднання обмоток у трикутник

3. Обертний момент і його залежність від ковзання.

Відносне відставання ротора від поля статора називають ковзанням і позначають буквою S. Величину ковзання можна визначити з рівняння

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (256)$$

Ковзання – основна змінна величина асинхронної машини, від якої залежить режим її роботи. З формули ковзання можна вивести формулу обертів ротора

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (257)$$

Кількість обертів ротора n_2 при номінальних навантаженні, напрузі та частоті зазначають на заводському щитку двигуна.

Величина ковзання асинхронних двигунів нормального типу становить приблизно $s = (1,5 \div 7)\%$. Ковзання можна визначити також у відсотках

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100, \%. \quad (258)$$

У асинхронного двигуна при нерухомому роторі ковзання має максимальне значення $s = 1$, тому що $n_2 = 0$. У початковий момент пуску в хід асинхронного двигуна, коли n_2 ще дорівнює нулю, $s = 1$.

Приклад. Визначити кількість обертів чотириполюсного асинхронного електродвигуна, що працює з ковзанням 3%.

Розв'язання. Для двопольного асинхронного електродвигуна швидкість обертання поля статора становить

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання ротора визначиться з формули ковзання

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad \text{звідки } n_2 = n_1(1 - s); \quad (259)$$

$$n_2 = 1500(1 - 0,03) = 1455 \text{ об/хв.}$$

4. Робочі характеристики і к.к.д. асинхронного двигуна.

Потужність, що споживається двигуном,

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1,$$

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P}.$$

5. Модифікація та коротка характеристика асинхронних двигунів сільськогосподарського призначення. З 1949 р. в СРСР виготовлялись єдиної серії асинхронні електродвигуни А і АО. У 1961 р. почали впроваджувати нову єдину серію асинхронних двигунів А2 і АО2 потужністю до 100 кВт. Ця серія двигунів характеризується підвищеною експлуатаційною надійністю через те, що при виготовленні їх застосовують високоміцні ізоляційні матеріали і лаки.

Двигуни нової серії 1–5 габаритів випускаються тільки у закритому обдувному виконанні, а двигуни 6–9 габаритів – у закритому обдувному і в захищеному виконанні. Двигуни серії А2 і АО2 порівняно з серією А і АО мають більші к. к. д. і $\cos \varphi$, менші розміри і меншу масу, що припадає на одиницю потужності.

Шкала потужностей двигунів нової серії складається з дев'ятнадцяти ступенів (замість чотирнадцяти у попередній серії): 0; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75 кВт.

На базі основного виконання двигунів загального призначення з короткозамкненим ротором виготовляють їх електричні модифікації, основними з яких є такі: з підвищеним ковзанням (АОС2, АОЛС2), в яких ковзання досягає 8–13%; з підвищеним пусковим моментом (АОП2), в яких пусковий момент досягає 1,7–1,8 МНм; багатошвидкісні (АО2); для текстильної промисловості (АОТ2); з фазним ротором (АК2, АОД2) та ін.

Умовні позначення асинхронних електродвигунів основного виконання розшифровуються так: А – асинхронний, О – обдувний, 2 – індекс, що характеризує нову серію; число після першого дефісу означає типорозмір: перша цифра – порядковий номер зовнішнього діаметра осердя статора (габарит), друга – порядковий номер довжини двигуна; після другого дефісу – кількість полюсів. Наприклад, АОС2-31-2 означає: асинхронний двигун, закритий, обдувний, нової єдиної серії, з чавунною оболонкою, підвищеним ковзанням, третього габариту, першої довжини, двополюсний. У випадку, коли двигун виготовляється з алюмінієвою оболонкою, в позначення включається буква Л.

Двигуни нової серії і всі їх модифікації, крім багатошвидкісних, виготовляються на номінальну напругу 220/380 В, а двигуни загального призначення А2 і АО2 потужністю більше 3 кВт також і на напругу 380 В (при з'єднанні обмоток трикутником). Багатошвидкісні двигуни виготовляються на напругу 380 В.

Асинхронні двигуни єдиної серії випускаються у вибухо-захищеному виконанні і позначаються ВАО (вибухобезпечний,

асинхронний, обдувний). Крім вибухозахищених двигунів єдиної серії, продовжують випускати вибухозахищені двигуни серій КОМ, КО, К і МА.

Зараз розробляється нова єдина серія асинхронних двигунів АЗ і АОЗ загальнопромислового застосування потужністю до 100 кВт. Ці електродвигуни за надійністю, енергетичними і ваговими показниками не будуть поступатись перед кращими зразками двигунів зарубіжних фірм. Для виготовлення обмоток цих двигунів будуть застосовані в основному обмоткові проводи з нагрівостійкою емалевою ізоляцією Е і Р. Двигуни цієї серії будуть мати шкалу потужностей, аналогічну серії А2 і АО2.

Асинхронні трифазні двигуни серії 4АМ загального призначення виготовляють з висотами вісі обертання від 50 до 250 мм. Порівняно з двигунами серії 4А вони мають менший на 5дБ рівень шуму, більший пусковий момент. Шкала потужності двигунів серії 4АМ відповідає шкалі потужностей двигунів серії 4А.

Електродвигуни серії АІ розроблені в рамках міжнародної організації по співробітництву у галузі електротехнічної промисловості “Інтерелектро” і відповідають перспективному рівню світового електромашинобудування.

Порівняно з двигунами серії 4А та 4 АМ вони мають кращі енергетичні показники: менші рівень шуму та маса; підвищена надійність і ступінь захисту.

6. Синхронні машини: будова та принцип дії. Синхронний двигун не має початкового пускового моменту. Оскільки синхронні машини обернені, синхронна машина, яка працює генератором, може працювати і в якості двигуна. Якщо синхронний генератор, працюючий паралельно в мережі, припинити обертати первинним двигуном, то генератор буде обертатись із синхронною частотою η_0 . І щоб синхронна машина працювала в режимі двигуна, досить прикласти до її валу гальмівний момент. У режимі двигуна ротор машини стане вже веденою ланкою.

Наразі синхронні двигуни пускають в рух так, як і асинхронні. Статор такого двигуна звичайний, а ротор, крім основної, має ще додаткову пускову короткозамкнену обмотку типу “білячої клітки” з товстих мідних або латунних стрижнів, які розташовані в отворах полюсних наконечників.

Асинхронний пуск синхронного двигуна здійснюється так. На час пуску основна обмотка ротора від’єднується від джерела постійного струму і замикається (за допомогою перемикача) на

розрядний резистор. Потім статорна обмотка двигуна вмикається в мережу. Виникаюче в машині обертаюче магнітне поле перетинає пускову короткозамкнену обмотку ротора і наводить в ній е.р.с., яка створює індукційний струм.

Взаємодія індуктивного струму ротора з обертаючим магнітним полем статора машини створює (як і в асинхронному двигуні) пусковий момент, який і розганяє ротор двигуна до частоти обертання, близької до синхронної ($n_2 \approx 0,95n_1$). Після цього основна обмотка ротора перемикачем підключається до живлячого її джерела постійного струму. Виникаючий при цьому в машині обертаючий момент доводить обертання ротора до синхронної швидкості і двигун продовжує працювати як синхронний.

Після пуску в робочому режимі пускова обмотка не бере участі. Однак при зміні навантаження, які викликають деякі коливання ротора, вона знову буде перетинатись полем статора і автоматично ввімкнеться в роботу. Її заспокоюючий момент згладжує коливання ротора, утримуючи двигун у синхронному режимі. Тому ця пускова короткозамкнена обмотка називається ще і заспокоюючою або демпферною.

Синхронні машини застосовуються на транспорті. Основним джерелом енергії якого є трифазні синхронні генератори. Синхронні двигуни використовують в установках великої потужності, які не потребують регулювання швидкості обертання.

7. Застосування синхронних машин у сільськогосподарському виробництві. Синхронною називають безколекторну машину змінного струму, ротор якої в усталеному режимі обертається з тією ж швидкістю і в тому ж напрямку, що і обертаюче магнітне поле.

Синхронні машини використовують як фазні синхронні генератори, які є основним джерелом електричної енергії трифазного змінного струму.

Синхронні двигуни великої потужності використовують у нерегульованих електроприводах компресорів, вентиляторів.

Синхронні двигуни потужністю до декількох десятків ват використовують в схемах автоматики, кіноустановках та інших, схемах, де необхідна висока стабільність швидкості.

Синхронні двигуни використовують в тих випадках, коли при заданій потужності і режимі роботи вони виявляються економічними, або коли необхідний привід з абсолютно жорсткою механічною характеристикою. У сільському господарстві синхронні двигуни застосовують рідко.

Будова. У пазах статора укладена трифазна силова обмотка. Початок фазних обмоток позначається $A_1B_1C_1$ кінці $X_1Y_1Z_1$. На роторі розміщено обмотку збудження. Вона з'єднана з джерелом постійного струму за допомогою кілець і щіток.

Принцип дії. Постійний магнітний потік, який створюється струмом ротора, замикається через сталь ротора, повітряний зазор, полюси статора.

Різнойменні полюси статора і ротора притягуються один до одного. Полюси статора мають змінну полярність. Зміна полярності відбувається з частотою обертового магнітного поля.

Полюси статора переміщуючись, тягнуть за собою полюси ротора, а разом з ними і весь ротор.

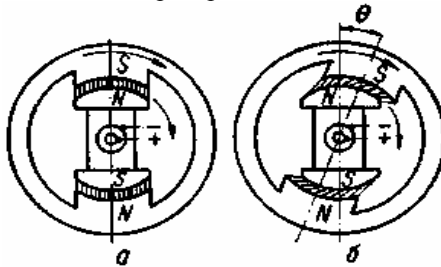


Рис. 97. Будова синхронного двигуна

8. Використання електричних машин постійного і змінного струму в автотракторному електрообладнанні: на автомобілях генератор є основним джерелом електричної енергії; він призначений для живлення всіх споживачів електричної енергії і заряджання акумуляторної батареї під час роботи двигуна на середніх і високих частотах обертання колінчатого вала

Привід важелів склоочисника здійснюється від електродвигуна паралельного або змішаного збудження. Електродвигуни, які застосовують для обдування вітрового скла: двополюсні, двошвидкісні; послідовного збудження, потужністю 15–50 Вт.

Синхронні електричні машини характерні тим, що в них ротор у сталому режимі обертається з кутовою швидкістю обертового магнітного поля, створюваного струмами у фазних обмотках статора, подібного до статора синхронної машини. Ця досягається тим, що ротор синхронної машини – це електромагніт, рідше постійний магніт з числом пар полюсів, рівним числу пар полюсів обертового

магнітного поля. Взаємодія полюсів магнітного поля і полюсів ротора забезпечує постійну кутову швидкість останнього, незалежно від моменту на валу. Ця властивість синхронних машин дозволяє використовувати їх як двигуни для приводу механізмів з постійною швидкістю. Поширення синхронних двигунів не настільки широке, як асинхронних, але в ряді випадків, наприклад, у металургії, їхнє використання стає необхідним. Одиначна потужність синхронного двигуна в приводах великої потужності досягає кількох десятків мегаватів.

В основному синхронні машини використовуються як промислові генератори для вироблення електричної енергії на електростанціях. Одиначна потужність сучасних електрогенераторів досягає 1500 МВ·А.

Будова синхронної машини

Основними частинами синхронної машини є статор і ротор, причому статор не відрізняється від статора асинхронної машини. Сердечник статора зібраний з ізолюваних одна від одної пластин електротехнічної сталі й укріплений усередині масивного корпусу. У пазах із внутрішньої сторони статора розміщена обмотка змінного струму, у більшості випадків трифазна.

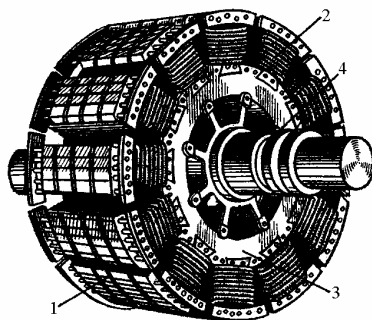


Рис. 98 Ротор синхронної машини:

*1 – полюса, 2 – полюсні котушки, 3 – осердя ротора,
4 – контактні кільця*

Ротор синхронної машини – це електромагніт – явнополюсний (рис. 98, де 1 – полюса, 2 – полюсні котушки, 3 – осердя ротора, 4 – контактні кільця) чи неявнополюсний (рис. 99, де 1 – осердя ротора, 2 – пази з обмоткою, 3 – контактні кільця).

Струм в обмотку ротора надходить через контактні кільця і щітки від зовнішнього джерела постійного струму – збудника.

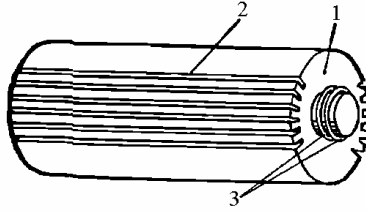


Рис. 99. Ротор неявнополюсної машини:

1 – осердя ротора, 2 – пази з обмоткою, 3 – контактні кільця

У багатополусної синхронної машини ротор має p -пару полюсів, а струми в обмотці статора утворюють теж p пара полюсів обертового магнітного поля (як в асинхронної машини). Ротор повинен обертатися з частотою обертання поля, отже, його синхронна частота обертання дорівнює $n = 60f/p$. (260)

При стандартній промисловій частоті 50 Гц максимальна частота обертання, що відповідає двополюсній ($p=1$) машині, буде 3000 об/хв. Це частота обертання сучасного *турбоагрегату*, що складається з первинного двигуна – парової турбіни і неявнополюсного синхронного генератора (турбогенератора).

У *гідроагрегату* гідравлічна турбіна обертається відносно повільно. Це змушує виготовляти гідрогенератори багатополусними з явними полюсами й у більшості випадків – вертикальним валом. Частота обертання цих генераторів – від 60 до декількох сотень обертів у хвилину, чому відповідає кілька десятків пар полюсів. Унаслідок відносно малих частот обертання генератори до гідравлічних турбін мають значно більшу масу на одиницю потужності – понад 8 кг/ (кВА), ніж генератори до парових турбін – менш 2,5 кг/ (кВА).

Контрольні запитання

1. Принцип дії синхронного двигуна.
2. Накресліть і поясніть робочі характеристики синхронного двигуна.
3. Як приєднані виводи обмотки статора до затискачів і чому вибрана така схема приєднання?
4. Що таке ковзання і як його визначають?

2. ОСНОВИ АВТОМАТИКИ

2.1. ІОННІ ПРИЛАДИ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

1. Неонові лампи.
2. Стабілітрони.
3. Цифрові індикатори.

1. Неонові лампи належать до газорозрядних приладів, дія яких базується на явищі електричного розряду в газах. Носіями заряду в них являються не тільки електрони, але і іони газу, які утворюються в процесі його іонізації. Крім іонізації і збудження атомів, у газі виникає зворотний процес утворення нейтральних атомів – рекомбінація, яка призводить до появи променевої енергії (газ світиться). Неонові лампи виготовляють у вигляді скляних балонів різної конструкції з двома електродами – катодом та анодом. Тиск інертних газів всередині балона – $(2\div 5)\times 10^3$ Па. Неонові лампи працюють на змінному та постійному струмі з послідовно ввімкненим струмообмежуючим резистором R_a .

Як правило, в неоновій лампі виникає самостійний газовий розряд (тобто катод холодний). Процес іонізації молекул газу між анодом і катодом лампи показаний на рис.100 а, а вольт-амперна характеристика – на рис. 100 б.

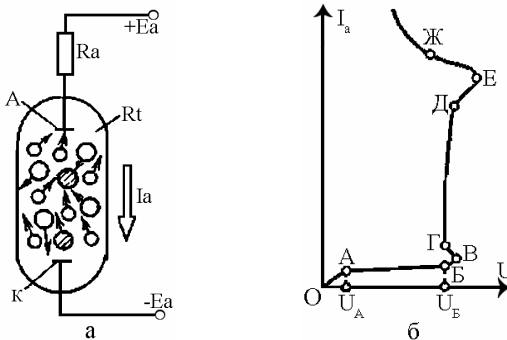


Рис. 100. а – процес іонізації молекул газу в лампі між анодом і катодом, б – вольт-амперна характеристика електричних розрядів в газах: тихого (ОБ), тліючого (ВГ), нормального тліючого (ГД), аномального тліючого (ДЕ) і дугового (ЕЖ)

Неонові лампи застосовують як світлові індикатори електричної напруги, в реле часу, простих електронних генераторах, при частоті до 10 кГц.

Основні параметри лампи: напруга запалювання U_3 на аноді; напруга джерела живлення U ; робочий струм I ; інтервал робочих температур. Поширені типи ламп – ТН-0,3; ТН-0,5; ТН-20; ТН-30 (Т – тліючий, Н – неонове наповнення, цифра – робочий струм, мА).

2. Стабілітрони. До стабілітронів належать газорозрядні прилади тліючого та коронного розрядів, що застосовують в електронних схемах стабілізаторів напруги. Більш поширені стабілітрони тліючого розряду, що працюють у режимі нормального катодного спаду, коли з ростом струму I_a від I_{min} до I_{max} спад напруги на лампі змінюється незначно, тобто напруга стабільна, що видно з мал. 101.

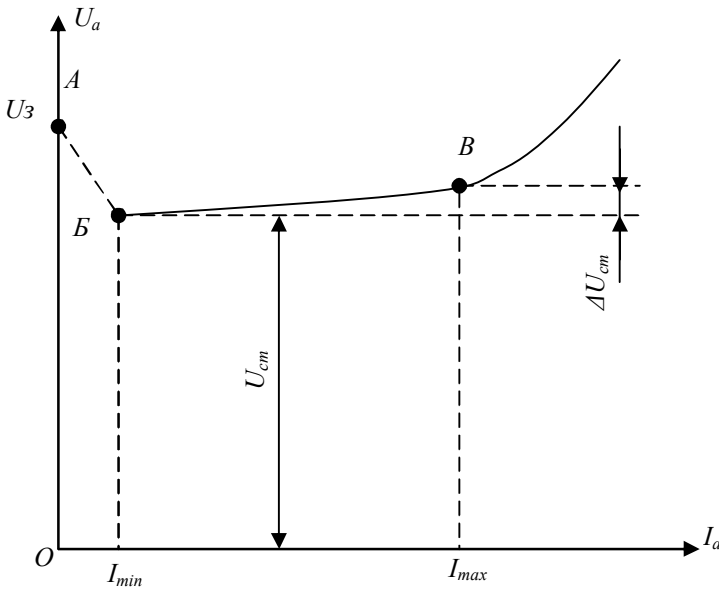


Рис. 101. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

При цьому спад напруги на резисторі $R_{обм}$ збільшується пропорційно до збільшення струму: $U_{вх}=U_R+U_{ст}$; $U_R=IR$ (B). Оптимальним режимом роботи стабілітрона вважають такий, за якого струм

навантаження рівний середньому струму стабілітрона $I_{\text{ст.сер}}$. тоді опір баластного резистора $R_{\text{обм}}$ підраховують за формулою:

$$R_{\text{обм}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст.сер}} + I_{\text{н}}} \text{ (Ом)}. \quad (261)$$

де $U_{\text{вх}} > U_{\text{ст}}$; $I_{\text{н}}$ – струм навантаження.

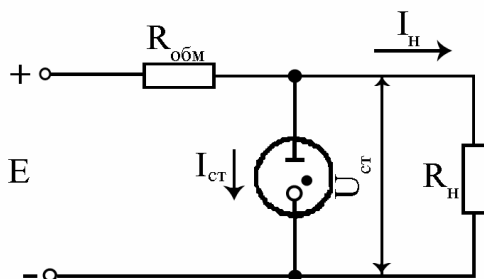


Рис. 102. Схема вмикання стабілітрона

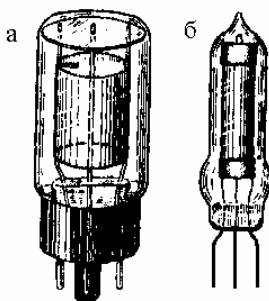


Рис. 103. Конструкція стабілітрона

Стабілітрони мають керамічний чи скляний балон, наповнений інертним газом (неон, аргон, гелій) при тиску $2 \div 4$ кПа. У стабілітронах коронного розряду, що працюють при більш високих напругах, колба наповнена воднем, внутрішній опір змінному струму $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$, якого сотні кілоОм. Для збільшення величини напруги стабілізації стабілітрони вмикають послідовно між собою і паралельно до навантаження.

Наприклад, від трьох стабілітронів з $U_{ст}=75$ В можна отримати напруги стабілізації 75, 150, 225 В. Паралельне вмикання стабілітронів не застосовують.

Ефективність стабілізації оцінюють коефіцієнтом стабілізації $K_{ст}$

$$K_{ст} = \frac{\Delta U/U}{\Delta U_{ст}/U_{ст}}. \quad (262)$$

У стабілітронів $K_{ст} = 10 \dots 20$ і зростає при каскадному вмиканні їх, коли $K_{ст} = K_{ст,1} \cdot K_{ст,2}$, $K_{ст} = 100 \dots 400$.

Типи стабілітронів газорозрядних: СГ20, СГ204К, СГ311С.

Параметри стабілітрона СГ20: напруга запалювання – 135В; напруга стабілізації - 85÷91В; $\Delta U_{ст}=0,5 \div 2,5$ В; $\Delta I_a=4 \div 15$ мА; діапазон робочих температур – 60÷100 °С.

Останнім часом більш поширені напівпровідникові стабілізатори, як більш надійні, економічні.

3. Цифрові індикатори. У сучасних пристроях електронної автоматики і обчислювальної техніки широко застосовують різні індикаторні прилади, у тому числі так звані знакові та цифрові індикатори. Деякі з них належать до газорозрядних приладів тліючого розряду, що працюють як і вакуумні чи напівпровідникові індикатори.

Завдання індикатора як багатоелектродного приладу, полягає в індикації різних електричних знаків, символів для сприйняття їх візуально оператором.

Конструктивно іонні індикатори являють собою скляний балон, заповнений інертним газом під тиском 4÷5 кПа, в якому цифри, букви, символи і т.п. служать катодом, розміщені один за другим, а один чи два анода виготовляють з проволочної сітки (мал. 104).

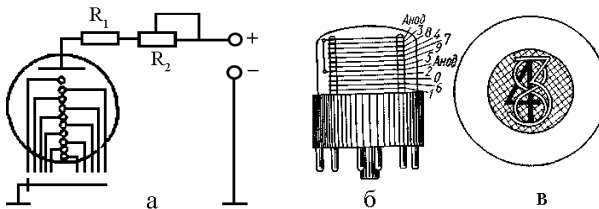


Рис. 104. а – схема вмикання цифрового індикатора; б – будова цифрового індикатора; в – вигляд цифрового індикатора з торця колби

Принцип індикації в тому, що при подачі напруги між анодом і даним катодом виникає світіння газу (біля катода), тобто видно певний знак (символ).

У вакуумних люмінесцентних індикаторах є оксидний катод прямого розжарювання, сітка (як і у вакуумному триоді) та аноди-сегменти, покриті люмінофором (мал.105).

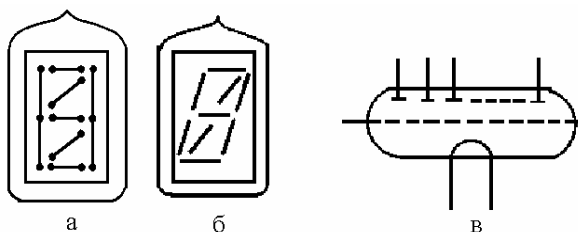


Рис. 105. а – знаковий розжарювальний вакуумний індикатор; б – вакуумний люмінесцентний індикатор; в – умовне графічне зображення

У цифрових індикаторах на основі світлових діодів зображення отримують в інтегральній мікросхемі, в якій електрично з'єднані діодні сегменти висвічують відповідні цифри, букви тощо.

Типи неонових індикаторних ламп – ІН-1, ІН-5, ІН-8, ІН-17.

Індикатори на світлових діодах – АЛ113А, АЛС314, АЛС321.

Застосовують спеціальні дисплеї на газорозрядних елементах (так звані плазмові). Вони мають дві взаємоперпендикулярні системи електродів у вигляді провідних смуг в середовищі інертного газу (неон, ксенон), що працюють на постійному чи змінному струмі.

Контрольні запитання

1. На якому явищі базується робота іонних приладів тліючого розряду?
2. Чим відрізняється самостійний газовий розряд від несамостійного?
3. Пояснити вольт-амперну характеристику стабілітрона.
4. Як побудовані та працюють цифрові індикатори?
5. Як вмикають в електричне коло цифрові індикатори?
6. Як застосовують світлові діоди в цифрових індикаторах, світлових табло, світлофорах?

2.2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

1. Структура напівпровідників.
2. Власна та домішкова провідність напівпровідників.
3. Електронно-дірковий (n-p) перехід і його властивості.
4. Вольт-амперна характеристика n-p-переходу.
5. Будова та технологія виготовлення n-p-переходів у діодах.
6. Різновиди діодів за функціональними ознаками.
7. Характеристики і параметри напівпровідникових діодів.

1. Структура напівпровідників. Напівпровідникові прилади і інтегральні мікросхеми (ІМС) виконуються на основі кристалічних напівпровідникових матеріалів, до яких відносяться речовини з питомим електричним опором від 10^2 – 10^3 до 10^8 – 10^9 Ом·см.

Речовини зі значно меншим опором (10^4 – 10^6 Ом·см) відносять до провідників, а зі значно більшим (10^{10} – 10^{18} Ом·см) – до діелектриків.

Напівпровідники відрізняються від провідників не стільки кількісними характеристиками електропровідності, скільки якісно іншим впливом на електропровідність різних факторів. Зокрема, зі збільшенням температури і вмісту домішок електропровідність напівпровідників збільшується, а провідників – зменшується. На відміну від провідників у напівпровідниках електропровідність значно більше залежить від різного роду опроміненнь. Ці особливості, як і характер електропровідності, напівпровідників обумовлені їх будовою (структурою).

Атом речовини складається із ядра і електронів, що обертаються навколо ядра на визначених орбітах. Сумарний негативний заряд електронів дорівнює позитивному заряду ядра, тому атом в цілому нейтральний.

Орбіти електронів віддалені на різні відстані від ядра. Кожній орбіті відповідає певний рівень енергії електрона. Чим далі віддалена орбіта від ядра, тим більшою енергією володіє електрон. Тому електрони зовнішніх орбіт зв'язані з ядром слабше від електронів внутрішніх орбіт.

Радіуси орбіт і енергія електронів, що їм відповідає, не можуть бути довільними, вони підпорядковуються відомим законам квантової механіки. Тому енергетичний спектр електронів в атомі (сукупність можливих значень енергії) є дискретним.

До напівпровідників відносять велику групу твердих речовин, які за своїми електричними властивостями (за кількістю

вільних електронів, а отже, й за електричним опором) посідають серед твердих тіл проміжне положення між провідниками та ізоляторами. Справді, питомий опір металів становить 10^{-1} – 10^{-4} Ом·м, ізоляторів 10^{12} – 10^{20} Ом·м, а питомий опір напівпровідників розміщується в діапазоні 10^{12} – 10^{-2} Ом·м. І коли в розглянутих раніше електронних приладах електричні заряди рухаються у вакуумі або газі, то в напівпровідникових приладах вони переміщуються в твердому тілі, в кристалах. З великої кількості різноманітних напівпровідникових речовин у радіотехніці найбільшого поширення набули германій і кремній, електричні властивості яких майже однакові.

2. Власна та домішкова провідність напівпровідників. Електричні властивості напівпровідників залежать від зв'язків між атомами кристала й від зв'язків електронів з ядрами атомів. У напівпровідниках ці зв'язки досить сильні, і тому вільних електронів у них дуже мало. Проте можна штучно розірвати деякі з цих зв'язків.

Наприклад, нагріваючи напівпровідник, надають його електронам додаткової енергії, і деякі з них залишають свої атоми, стаючи вільними. Ці електрони при відсутності зовнішнього електричного поля рухаються в напівпровіднику безладно, в різних напрямках. Атом, що втратив електрон і тому став заряджений позитивно, не пересувається по напівпровіднику подібно до електрона, а коливається в межах середнього свого положення в кристалі. Можна вважати, що на місцях електронів, вирваних із своїх зв'язків, утворюються, так би мовити, вільні місця, які прийнято називати *дірками*. Природно, що кількість електронів у напівпровіднику дорівнює кількості дірок. Коли електрон опиняється в зоні дії електричного поля якоїсь дірки, вона захоплює його, негативний заряд електрона нейтралізується позитивним зарядом дірки, і відновлюється нейтральний атом. Така рекомбінація дірок і електронів відбувається дуже часто, проте не менш часто утворюються й нові електрони і дірки, так що в середньому їх кількість для певного напівпровідника в конкретних умовах (перш за все для певної температури) є величиною сталою.

Коли до кристала напівпровідника прикласти електричну напругу, то утворюється впорядкований рух електронів, тобто через напівпровідник проходить електричний струм, зумовлений його електронною і дірковою провідностями. Цю провідність можна назвати власною, оскільки вона залежить від власних ресурсів напівпровідника.

У напівпровіднику можна штучно створити такі умови, коли кількість електронів не дорівнюватиме кількості дірок, а отже,

перенесення зарядів – електропровідність – зумовлюватиметься рухом зарядів переважно одного знака: або електронів, або дірок. На практиці цього досягають уведенням мізерної кількості домішок до чистого напівпровідника.

Так, коли до кристала германію ввести атоми хімічних елементів п'ятої групи таблиці Менделєєва, наприклад миш'яку, то виявляється, що один з електронів атома миш'яку буде дуже слабо зв'язаний з ядром атома, тобто його можна вважати вільним. У результаті подібної операції в кристалі германію, який залишається електрично нейтральним, електронів стає значно більше, ніж дірок, а провідність напівпровідника різко зростає за рахунок вільних електронів, які є в цьому випадку основними носіями струму. Цю домішку називають *донорською* (від латинського слова – *donor*, що означає – той, що віддає; у цьому випадку – електрони). Напівпровідник з такою домішкою прийнято називати напівпровідником типу *n* (від англійського слова *negative* – негативний). Для германію як домішки звичайно застосовують фосфор, алюміній, бор.

Можна, проте, задати напівпровіднику провідність іншого типу, додавши до кристала напівпровідника так званих *акцепторних домішок*, тобто таких домішок, які б ніби поглинали електрони (акцептор у перекладі з латинської – поглинач). Для германію як акцептор найчастіше використовують елементи третьої групи таблиці Менделєєва, наприклад індій. Атоми індію, потрапляючи до кристала германію, хоча й залишаються нейтральними, проте поведуться так, наче їм бракує електронів, тобто насправді виявляють властивості позитивного заряду – дірки. Як уже зазначалось, дірка може захопити електрон, зв'язаний з сусіднім атомом, але в цьому випадку вже сусідній атом матиме властивості дірки. Він, у свою чергу, здатний узяти електрон з іншого сусіднього атома і т. д. Таким чином, хоча атоми й залишаються на своїх місцях, але дірка ніби переміщається, що відповідає переміщенню електричного заряду. Отже, електропровідність кристала з акцепторною домішкою різко зростає за рахунок дірок – у цьому випадку основних носіїв струму. Напівпровідник з акцепторними домішками прийнято називати напівпровідником типу *p* (від англійського *positive* – позитивний).

Слід зазначити, що крім електронів і дірок, утворених внаслідок уведення тієї чи іншої домішки, позитивні і негативні заряди в напівпровіднику утворюються й під впливом температурних дій, але при звичайних (кімнатних) температурах таких зарядів мало, і вони не є основними носіями струму.

Дуже важливо ясно і чітко уявляти собі, що введення поняття “дірка” лише зручна умовна модель, яка сприяє опису й розумінню процесів, що відбуваються в напівпровіднику. Насправді перенесення зарядів у всіх випадках здійснюється тільки електронами.

3. Електронно-дірковий перехід і його властивості. Винятково важливі властивості напівпровідників, що зумовили надзвичайно широке застосування їх, виявляються в пограничній області, точніше в дуже тонкому шарі речовини між двома частинами напівпровідника, які мають провідності різних видів. Цей шар дістав назву електронно-діркового переходу або, скорочено р- n-переходу. Визначальна властивість р-n-переходу – його одностороння провідність.

Спрощено механізм односторонньої провідності можна пояснити так (рис. 106, а). Оскільки в області р з дірковою провідністю рухомих електронів значно менше, ніж в області з n електронною провідністю, то електрони з n-шару починають переходити в р-шар (біля їх межі), а дірки в цей час рухатимуться в зворотному напрямку. При цьому електрична нейтральність кожної області буде порушена. У пограничному шарі з провідністю типу n утворюється позитивний об’ємний заряд, а в р-області, тобто по той бік межі – негативний.

Таким чином, у тонкому шарі напівпровідника біля межі поділу р- і n-областей утворюються дві зони об’ємних різнойменних електричних зарядів. Цей шар і є, власне, р-n-переходом. Природно, що утворення різнойменних зарядів спричинює утворення електричного поля. Це поле перешкоджає прониканню електронів у р-область, а дірок у n-область, причому настільки ефективно, що лише окремі електрони і дірки, які мають підвищену енергію, можуть подолати його гальмівну дію. Настає стабільний стан р-n-переходу.

Коли до напівпровідника прикласти електричну напругу, то залежно від полярності цієї напруги р-n-перехід виявляє зовсім різні властивості. Якщо негативний полюс джерела під’єднано до n-області кристала, а позитивний – до р-області (рис. 106, б), то зовнішнє електричне поле і поле р-n-переходу направлені в протилежні боки. Тому електричне поле р-n-переходу буде в значній мірі послаблено, і тепер вже електрони з n-області зможуть проникати в р-область, а дірки з р-області – в n-область. Таким чином, у колі джерело живлення – напівпровідник утворюється струм. Полярність прикладеної напруги, при якій через напівпровідник проходить струм (як у розглянутому випадку), дістала назву прямої полярності. Коли ж негативний полюс джерела живлення підімкнено до р-області кристала, а позитивний до n-області (рис. 106, в), електричні поля джерела і р-n-переходу

збігаються. Сумарне поле зростає і ще в більшій мірі (ніж до під'єднання джерела живлення) перешкоджатиме проходженню зарядів через р-n-перехід.

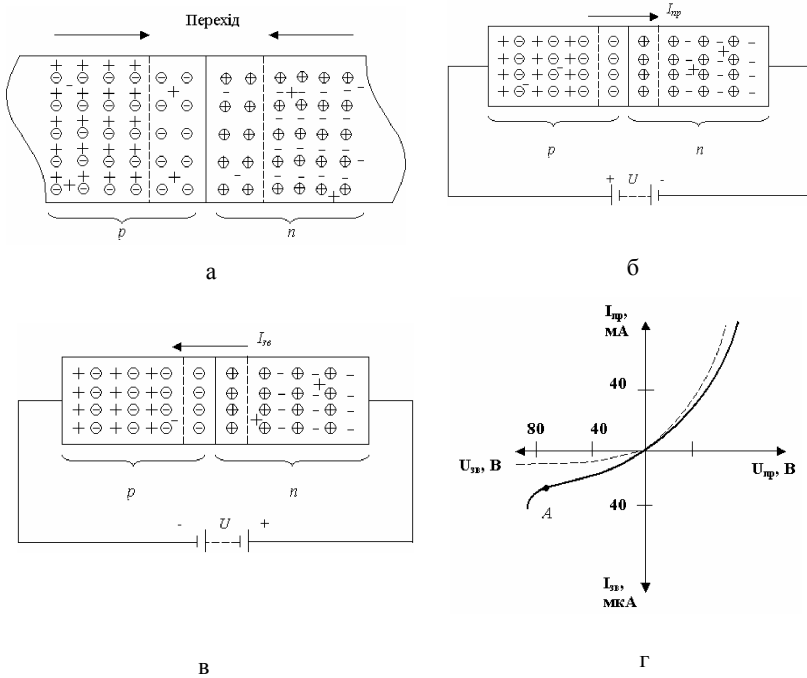


Рис. 106. р-n-перехід:

а – загальна структура; б – пряме вмикання джерела живлення; в – зворотнє вмикання джерела живлення; г – теоретична (штрихова) і реальна вольт-амперні характеристики

Коли розглядати ідеальний випадок, то електричного струму через перехід не буде. Таку полярність прикладеної до кристала напруги називають зворотною. Таким чином, з певною мірою наближення можна вважати, що електричний струм через р-n-перехід проходить, якщо полярність напруги джерела живлення пряма, і, навпаки, струму немає, коли полярність зворотна.

Проте в реальних умовах у напівпровіднику крім основних носіїв електричних зарядів – електронів і дірок, які утворюються введенням домішок, є, як було показано, й неосновні носії зарядів (їх

значно менше) – електрони і дірки, що утворюються внаслідок теплового руху атомів у кристалі. Частина цих електронів і дірок здатна проходити (дрейфувати) через р-п-перехід навіть при зворотній полярності прикладеної до напівпровідника напруги, створюючи так званий зворотний струм, який, звичайно, незрівнянно менший за прямий струм. Отже, р-п-перехід напівпровідника досить певно виявляє властивість односторонньої провідності, що дає змогу розглядати кристал як вентиль.

4. Вольт-амперна характеристика р-п-переходу. Вольт-амперна характеристика р-п-переходу (рис. 10б, г) показує, що вже при порівняно невеликих прямих напругах опір переходу спадає, а прямий струм різко збільшується.

У напівпровідників зворотні напруги $U_{зв}$ значно більші за прямі $U_{пр}$, а зворотні струми набагато слабші від прямих струмів, проте при деякому більшому значенні зворотної напруги настає явище так званого пробою р-п-переходу і зворотний струм різко зростає (точка А). В цьому режимі напруга на діоді змінюється дуже мало, навіть при зміні струму через прилад у досить широких межах, тобто напівпровідник поводить себе як стабілітрон. Такий режим, який вважається аварійним для напівпровідникових випрямлячів, з успіхом використовується в пристроях стабілізації напруги.

Ще одна цікава особливість р-п-переходу полягає в тому, що в діапазоні зворотних напруг, які не перевищують напруги пробою, перехід виявляє ємнісні властивості, тобто поводить себе як конденсатор, причому ємність переходу обернено пропорційна прикладеній напрузі. Ця властивість широко використовується там, де виникає потреба застосування конденсаторів змінної ємності, які перестроюються не вручну, а автоматично – залежно від зворотної напруги, прикладеної до р-п-переходу.

5. Будова та технологія виготовлення р-п-переходів у діодах.

Будову напівпровідникового діода виготовленого за планарною технологією показано на рис. 107, а. Планарна технологія припускає виготовлення напівпровідникового приладу на одній пластині напівпровідникового матеріалу. Області р- і п-типів монокристалу кремнію, що утворюють р-п-перехід, з'єднуються з выводами діода анодом і катодом за допомогою невідпаяючих контактів метал – напівпровідник. Діелектрична плівка двоокису кремнію SiO_2 захищає р-п-перехід від впливу вологи і домішок, що містяться в

навколишньому середовищі. При утворенні дискретних напівпровідникових діодів кристал з р-n-переходом розміщується в герметичний металевий або неметалевий корпус або повністю накривається плівкою двоокису кремнію.

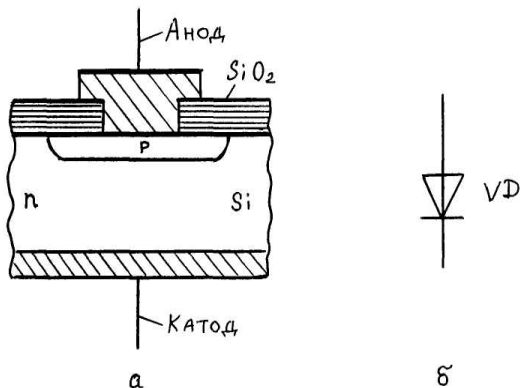


Рис.107. Будова (а) та умовне позначення діода (б)

6. Різновиди діодів за функціональними ознаками. Дана теорія і властивості площинних напівпровідникових діодів лежать в основі всіх інших типів діодів, кількість яких в наш час досить велика.

До них відносяться випрямні, імпульсні діоди, стабілітрони, варикапи, фото- і світлодіоди, а також спеціальні (тунельні, параметричні, детекторні та ін.) діоди.

Випрямні діоди. Ці діоди призначені для перетворення змінної напруги джерел живлення в постійну і мають обмежений частотний діапазон роботи, який складає десятки-сотні Гц. Так, наприклад, при перетворенні промислового змінного струму в постійний робоча частота складає всього 50 Гц. Дещо більшу частоту мають деякі спеціальні мережі змінного струму (наприклад 200 Гц, 400 Гц). Найбільш широке застосування знайшли кремнієві сплавні діоди (Д206, Д217, Д226). Це обумовлено більшою стійкістю до перегрівання порівняно з германієвими діодами типу Д7. Для випрямлення змінного струму з частотою до 1 кГц застосовують кремнієві сплавні діоди Д242-Д248.

Вибір діодів для випрямлячів змінного струму здійснюється по максимальному середньому випрямленому струму і максимальному значенню зворотної напруги.

При кімнатній температурі пробивна напруга для германієвих діодів звичайно становить 40-100В. Кремнієві діоди можуть мати напругу пробою до 1000 В і більше.

Германієві і кремнієві діоди використовуються як випрямлячі, вони мають високий ККД. Германієві і кремнієві діоди можна також з'єднувати послідовно в тих випадках, якщо необхідно отримати випрямляч на підвищені робочі напруги. Для збільшення випрямлених струмів можна використовувати паралельне вмикання діодів.

Імпульсні діоди. Найважливішою сферою застосування імпульсних діодів, що визначає сама назва цих діодів, є імпульсні і комутаційні схеми обчислювальної техніки. Найбільш загальне призначення діода в цих схемах полягає в тому, що він виконує функції ключа, аналогічно релейно-контактному елементу. Як відомо, будь-який ключовий елемент має два стани: відкритий, в якому він з'єднує дві точки електричного кола (точки його включення), і закритий, в якому розриває ці точки. "Ідеальний ключ" має нульовий опір у відкритому стані і нескінченно великий – в закритому.

Крім того, він повинен "уміти" безінерційно, миттєво переходити із одного стану в інший.

Вибір імпульсного діода здійснюється з урахуванням його найважливіших параметрів, до яких відносяться: постійний зворотний струм діода при заданій зворотній напрузі, постійна пряма напруга при заданому прямому струмі і час відновлення зворотного опору діода. Останній параметр є основним, а нерідко і єдиним параметром, який використовується для характеристики перехідного процесу переключення діода. В даний час для роботи в швидкодіючих імпульсних схемах використовуються імпульсні арсенідо-галієві діоди типу АД 516 з прямою напругою 1,5 В, постійним зворотнім струмом $I_{зв}=2\text{мкА}$ і часом відновлення $T_{відн}=1\text{ нс}$. Широке розповсюдження в схемах комутації мають діоди типу Д219, Д220 з прямою напругою $U_{пр}=1,0-1,5\text{ В}$, струмом $I_{зв}=30-40\text{ мкА}$ і часом $T_{відн}<0,5\text{ мкс}$.

Найбільш широке застосування імпульсні діоди знаходять в логічних елементах, які є елементною базою цифрових обчислювальних машин, а також в комутаційних схемах безконтактної апаратури автоматики.

Фотодіоди. В фотодіодах використовуються чутливість електронно-діркового переходу в напівпровідникових кристалах до світлового потоку Φ . Звичайно використовуються кристали германію або кремнію. Рис.108,а пояснює принцип роботи фотодіода. Діод вмикається в коло джерела живлення в напрямку зворотної

провідності. При відсутності світлового потоку Φ в колі навантаження R_H протікає невеликий струм зворотної провідності – “темновий” струм

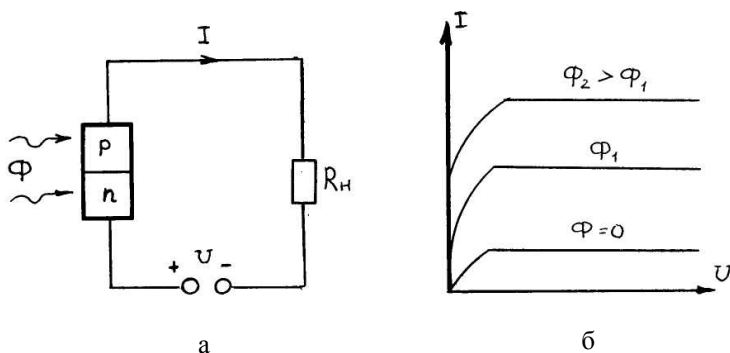


Рис.108. Схема фотодіода (а) і залежність фотоструму від світлового потоку (б)

Якщо зона електроннодіркового р-п-переходу освітлюється, то струм зростає приблизно пропорційно величині світлового потоку (рис. 108,б). У германієвих фотодіодах “темновий” струм має величину 10–30 мкА, а при освітленні – декілька сот мікроампер. Оскільки струм фотодіода малий, як правило, виникає необхідність його підсилення за допомогою електронних підсилювачів. Фотодіоди мають широке застосування в автоматичі і телемеханіці і є основними елементами в різних схемах фотоелектронних реле і підсилювачів.

Світлодіоди. Напівпровідникові випромінювачі на р-п-переході, в яких використовується спонтанне випромінювання, називаються світлодіодами. Інколи їх називають також люмінесцентними діодами.

Світлодіоди дозволяють створювати оптично-електронні схеми і прилади, в яких зв’язок між елементами, керування електричним колом, перетворення і підсилення сигналів здійснюється за допомогою світлового потоку. В оптично-електронних схемах вхід і вихід можуть бути електрично розведеними між собою. Опір між джерелом світла і приймачем променевої енергії, які є основною ланкою передачі сигналів в оптично-електронних схемах, може перевищувати 10^{16} Ом при малій ємності між ними (близько 1×10^{-4} пФ). Найважливішою особливістю оптичного зв’язку в оптично-електронних приладах є відсутність зворотного впливу приймача світла на його джерело. Для

реалізації оптично-електронних схем світлодіоди є цілком зручним пристроєм: вони компактні, мають досить високий ККД і випромінюють в порівняно вузькому спектральному діапазоні.

Випромінювання в світлодіоді генеруються в шарі безпосередньо прилеглому до площини розділу р- і n-напівпровідників, і виводиться назовні, як правило, через n-область р-n структури, з плоскої чи напівсферичної поверхні (рис. 109). Площина випромінювальної поверхні лежить в межах від десятих часток до одиниць квадратних міліметрів. Габарити світлодіода з арматурою для включення в коло джерела живлення не перевищує декількох міліметрів. Конфігурація світловихідної поверхні створює суттєвий вплив на енергетичні характеристики світлодіода. В світлодіодах плоскої конфігурації значна частина випромінювання зазнає повне внутрішнє випередження. Випромінювання, що падає на границю розділу під кутом більше 17° , повністю відбивається і в остаточному результаті поглинається в світлодіоді

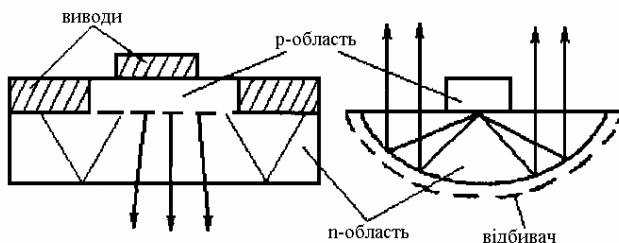


Рис. 109. Будова світлодіода

Мала інерційність світлодіодів дозволяє формувати досить короткі світлові імпульси з крупними фронтами і з частотою повторення до декількох десятків МГц. Суттєвими перевагами світлодіодів є висока електрична яскравість. Основна частина енергії випромінювання концентрується в спектральному інтервалі шириною 400–500 А ($1 \text{ А} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$). До ряду основних електричних і світлових параметрів належать: повна потужність випромінювання $U_{\text{пр}}$, ширина спектру випромінювання, час наростання і спадання імпульсу випромінювання $t_{\text{н}}$ і $t_{\text{сп}}$. Для світлодіодів типу АЛ103, АЛ106, АЛ108, АЛ109 величина P лежить в межах від 0,2 до 1,5 мВт при прямій напрузі від 2 до 3 В. Ширина спектру таких діодів складає 30–70 нм. Світлодіоди типу АЛ107, АЛ108 призначені для роботи в ролі джерела інфрачервоного випромінювання з довжиною хвилі 0,94–0,95 мкм.

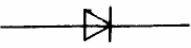
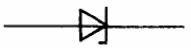
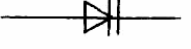


Карбідокремнієві діоди типу КЛ101, КЛ104 призначені для роботи в якості індикаторів з жовтим кольором світіння.

Позначення напівпровідникових діодів складаються з чотирьох елементів. Перший елемент, буква чи цифра, позначає матеріал: Г або 1 – германій або його сполуки, К або 2 – кремній або його сполуки, А або 3 – сполуки галію. Другий елемент – літера, що вказує клас діода: Д-діод, А-діод НВЧ, В-варикап, Л-випромінювач, С-стабілітрон. Третій елемент – число, яке вказує призначення: якісні властивості діодів, а також порядковий номер розробки у відповідності з нижче приведеною таблицею.

Діоди випрямні	
малої потужності, $I < 0,3 \text{ А}$	від 101 до 199
середньої потужності, $0,3 < I < 10 \text{ А}$	від 201 до 299
універсальні, ($f < \Gamma \Gamma \text{ ц}$)	від 401 до 499
імпульсні	
$T_{\text{відн}} > 150 \text{ нс}$	від 501 до 599
$30 < T_{\text{відн}} < 150 \text{ нс}$	від 601 до 699
$5 < T_{\text{відн}} < 30 \text{ нс}$	від 701 до 799
Випромінювачі	
інфрачервоного діапазону	від 101 до 199
видимого діапазону з яскравістю $< 500 \text{ нит}$	від 301 до 399
і яскравістю $> 500 \text{ нит}$	від 401 до 499
Стабілітрони великої потужності $P > 5 \text{ Вт}$:	
напруга стабілізації до 10В	від 701 до 799
напруга стабілізації від 10 до 99В	від 810 до 899
напруга стабілізації від 100 до 199В	від 901 до 999

Четвертий елемент – літера, яка вказує різновид типу із даної групи діодів (поділяються на параметричні групи по напрузі, температурі та ін.).

Приклад позначення напівпровідникового діоду: КД503Б (Д503Б) – кремнієвий імпульсний діод з часом відновлення $T_{\text{відн}} < 150 \text{ нс}$, різновид типу Б. Графічне умовне зображення напівпровідникових діодів:

Назва діода	Позначення
випрямний діод	
стабілітрон	
варикап	
фотодіод	
світлодіод	

7. Характеристики і параметри напівпровідникових діодів.

Вольт-амперна характеристика діода представляє залежність струму діода від величини напруги, прикладеної до р-n-переходу. Характеристика має пряму і обернену гілки. Остання визначається оберненою напругою діода (рис.110). Вольт-амперні характеристики діодів залежать від температури, що пояснюється головним чином впливом температури на величину струму провідності (I_s). Чим більша температура, тим більше електронно-діркових пар з'являється в напівпровіднику і тим більше струм провідності. Тому гілка вольт-амперної характеристики при більшій температурі T_2 йде крутіше, ніж при меншій температурі T_1 . Із збільшенням температури всі складові зворотного струму зростають, тому зворотна гілка вольт-амперної характеристики для $T_2 > T_1$ відповідає більшим струмам.

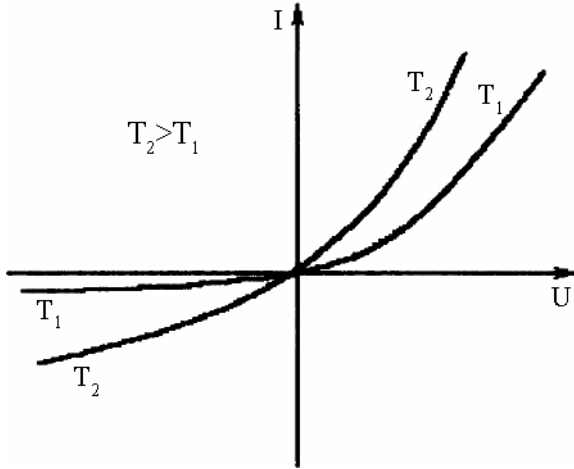


Рис. 110. Вольт-амперна характеристика діода

Звичайно, зворотний струм діода збільшується в 2 рази при збільшенні температури на 10°C . Пряма напруга на діоді (при $I = \text{const}$) зменшується із збільшенням температури на $1,5\text{-}2,5 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$.

Вольт-амперні характеристики германієвих і кремнієвих діодів зображені на рис. 110. Вони мають відмінності як при прямому, так і при зворотному зміщенні. Так як у кремнію ширина забороненої зони більша ($\Delta W_{\text{Ge}}=0,72\text{eV}$; $\Delta W_{\text{Si}}=1,12\text{eV}$), то струм провідності (I_s) у кремнієвих діодів значно, на декілька пунктів менше, ніж у германієвих діодів. Тому цього ж значення струм в кремнієвому діоді досягає при більшій напрузі (рис. 111). Зворотні ж струми із-за наявності в них складових струму термогенерації в p-n-переході і струму витoku відмінні тільки в $10\text{--}100$ разів.

Падіння напруги на діоді в широкому діапазоні прямих струмів змінюється мало: у германієвих діодах звичайно в межах $0,35\text{-}0,45 \text{ В}$, а у кремнієвих діодах в межах $0,6\text{-}1,0 \text{ В}$.

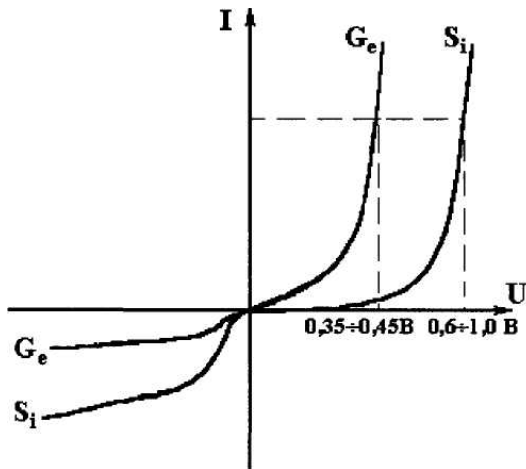


Рис.111. Вольт-амперні характеристики германієвих і кремнієвих діодів

В ряді випадків для послаблення зворотного опору р-п-переходу і для послаблення залежності ємності переходу від напруги на стикові р- і п-областей утворюється і-область, яка сильно збіднена на домішки, так звані р-і-п діоди. Такі діоди використовують також в ролі перемикачів СВЧ в комутаційних схемах.

Крім вказаних параметрів при виборі діодів необхідно враховувати прямі падіння напруги на діоді, а також його внутрішній опір.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову і роботу р-п-переходу в напівпровідниках.
2. Назвіть основну властивість електронно-діркового переходу.
3. За якими технологіями виготовляють р-п-переходи у діодах?
4. Назвіть різновиди діодів і поясніть їх призначення.
5. Які основні параметри напівпровідникових діодів вам відомі?

2.3. ТРАНЗИСТОРИ

1. Біполярний транзистор, його будова, принцип дії.
2. Схеми вмикання транзисторів, підсилювальні властивості транзисторів.
3. Польові транзистори: основні визначення, будова та принцип дії. Характеристики і параметри.

1. Біполярний транзистор, його будова, принцип дії, застосування. Біполярний транзистор – це триелектродний, керований, з двома **p-n**-переходами напівпровідниковий прилад, що застосовується в схемах електронних підсилювачів, генераторів, випрямлячів та для комутації електричних кіл.

Так як в їх роботі беруть участь дірки і електрони, тобто носії двох типів, то транзистори звуть біполярними, а якщо в транзисторі, наприклад польовому, беруть участь дірки або електрони, то такі прилади звуть уніполярними.

Біполярні транзистори (у подальшому транзистори) розрізняють за частотою, потужністю, матеріалом напівпровідника, конструкцією тощо.

При виготовленні транзисторів користуються методами: сплавлення, дифузії, планарно-епітаксialним тощо.

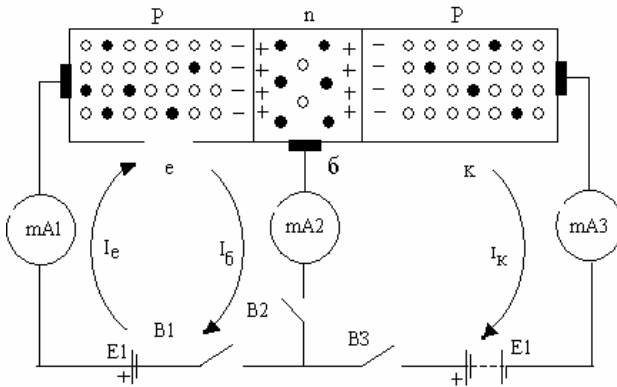


Рис. 112. Робота біполярного транзистора

Будова біполярного транзистора: в пластинку, наприклад, германію, леговану донорною домішкою **n**-типу вплавлені дві таблетки тривалентного індію (акцептор). У пластині германію на

стику з таблеткою індію виникають два **p-n**-переходи, що називаються емітерним та колекторним. Від кожної з областей – емітер, база, колектор зроблені виводи для вмикання транзистора в електричне коло.

Будова транзистора показана на рис. 113, а схема вмикання – на рис. 112, принцип дії транзистора базується на властивостях **p-n**-переходів. В транзисторі **p-n-p**-структури струм колектора визначається рухом дірок, а в транзисторі **n-p-n**-рухом електронів.

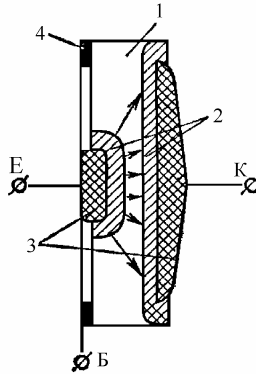


Рис. 113. Будова біполярного транзистора p-n-p-структури:
 1 – кристал германія n-типу; 2 – p-сфера; 3 – таблетка індію;
 4 – контактне кільце бази; E – емітер; K – колектор; B – база;
 стрілками показано рух дірок у сферу колектора

Як видно з рис. 112 до емітерного переходу прикладена пряма напруга, а до колекторного – зворотна. Через відкритий емітерний перехід дірки з емітера направляються в область тонкої бази, утворюючи струм емітера I_e . Одночасно з бази в емітер, зустрічно, направляються електрони, але цей потік невеликий, так як концентрація дірок в емітері набагато більша, ніж електронів у базі, тому струм I_e визначається в основному рухом дірок у базу. Частина дірок у базі рекомбінують з електронами бази, але більшість з них досягає прискорюючого поля колекторного переходу, утворюючи струм колектора I_k . З джерела енергії E_1 надходять електрони, скомпоновані дірками, що надійшли з емітера, утворюючи струм бази I_b . Як видно I_b проходить по колу:

$$\begin{aligned}
 +E_1 &\longrightarrow \text{емітер} \longrightarrow \text{база} \longrightarrow -E_1, \text{ а } I_k - \text{ по колу:} \\
 +E_2 &\longrightarrow \text{емітер} \longrightarrow \text{база} \longrightarrow \text{колектор} \longrightarrow -E_2.
 \end{aligned}$$

Враховуючи малу ступінь рекомбінації дірок з електронами в базі, можна припустити, що $I_k \approx I_e$, хоч точніше $I_e = I_k + I_b$.

У **n-p-n** транзисторі полярність E_1 і E_2 протилежна, напрям струмів також протилежний.

2. Схеми вмикання транзисторів, підсилювальні властивості транзисторів. Підсилювальні властивості транзистора основані на залежності струму I_k від величини напруги $U_{eб}$ наведено на рис. 114.

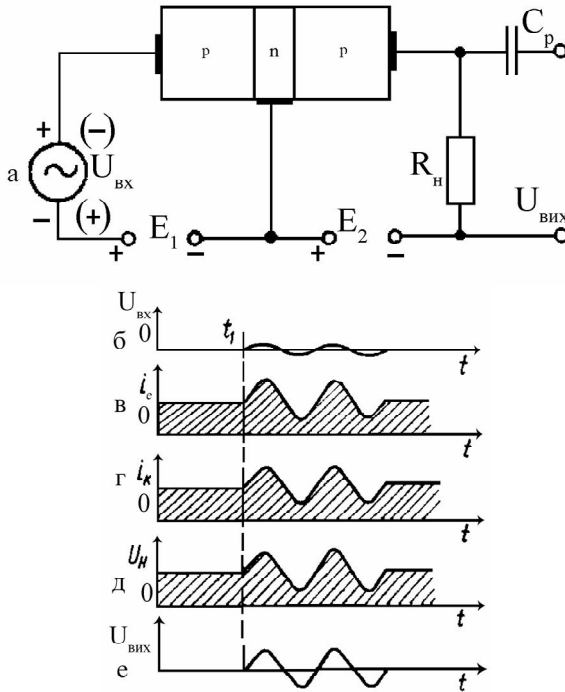


Рис. 114. Підсилення електричних сигналів за допомогою транзистора:
а – схема вмикання p-n-p транзистора із загальною базою; б – форма вхідного сигналу, поданого на вхід підсилювача; в – форма вхідного струму емітера транзистора; г – форма вихідного підсиленого сигналу струму колектора; д – вихідна підсилена напруга на навантаженні R_n ; е – форма вихідної напруги на транзисторі

За відсутності змінної напруги $U_{вх}$ до моменту часу t_1 у колі протікає струм колектора I_k , струм емітера I_e майже рівні між собою. На навантаженні R_n з'являється напруга $U_n = I_k R_n$ (В). При подачі на

вхід транзистора напруги $U_{вх}$ в момент часу t_1 струм I_e стає пульсуючим, а значить I_k , I_b також будуть пульсуючими, у результаті $U_{вих}$ стане пульсуючим, повторюючи форму, частоту $U_{вх}$. Змінна складова напруги U_n відокремлюється від постійної конденсатором C_p і подається на вихід підсилювача у вигляді змінної напруги $U_{вих}$.

Відношення $\kappa_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$ називають коефіцієнтом підсилення по

напрузі, аналогічно по струму $\kappa_I = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e}$ та по потужності $\kappa_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}$.

Все ж підсилення сигналу з допомогою транзистора відбувається за рахунок енергії джерела живлення, а транзистор є регулятором, який під дією слабкого вхідного сигналу в колі з малим опором, змінює струм на виході, що має великий опір. Необхідно відмітити, що струм I_e створюється джерелом $U_{вх}$, а вихідний струм I_k і його приріст ΔI_k визначається величиною E_k .

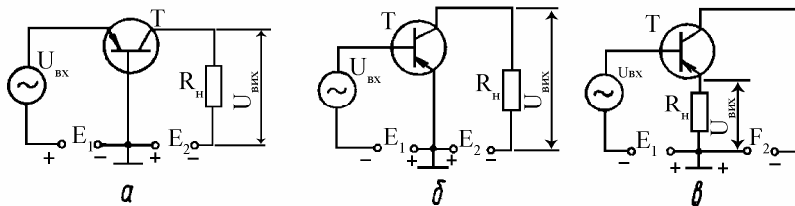


Рис. 115. Схеми вмикання транзисторів:
а – з загальною базою; *б* – з загальним емітером;
в – з загальним колектором

Незалежно від типу транзистора **p-n-p** чи **n-p-n** розрізняють три схеми вмикання їх. При цьому один електрод є вхідним, другий – вихідним, а третій – спільним за входом та виходом, які і видно з рис.115. Так у схемі із загальною базою (ЗБ) вхідний сигнал $U_{вх}$ прикладається до ділянки емітер – база, джерела E_1 , E_2 ввімкнені між електродами колектор – база, а R_n – у коло колектора. Вхідним є струм I_e , а вихідним – струм I_k , оскільки $I_e \approx I_k$, то $\kappa_I = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_k} \approx 1$.

Схема має малий $R_{вх}$ і великий $R_{вих}$ (сотні кОм), що обмежує застосування їх.

Схема із загальним емітером застосовується частіше. $U_{вх}$ прикладається до ділянки база – емітер, джерело E_2 і R_n вмикаються

послідовно. Вхідним є струм бази, а вихідним $-I_K$. $R_{вх}$ більше, ніж у схемі із вмиканням з ЗБ, а $R_{вих}$ – достатньо велике. Це дає велике підсилення по струму

$$k_i = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{б}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_e - \Delta I_K} = \frac{1}{\frac{\Delta I_e}{\Delta I_K} - 1} \gg 1 \quad (263)$$

У схемі із загальним колектором (ЗК) вхідний сигнал подається на ділянку база – колектор, $R_{н}$ вмикається в коло емітера. Вхідним є струм бази, вихідним $-I_e$. $R_{вх}$ – великий, а $R_{вих}$ – сотні Ом. Коефіцієнти підсилення $k_U < 1$, а $U_{вх}$ і $U_{вих}$ співпадають за фазою.

Приведемо статичні характеристики транзистора **p-n-p** структури для схеми вмикання з ЗЕ. Розрізняють вхідну характеристику $I_{б}=f(U_{еб})$, $U_K=const$ та вихідну $I_K=f(U_K)$ при $I_{б}=const$ наведено на рис.116, а схема для їх зняття – на рис.117.

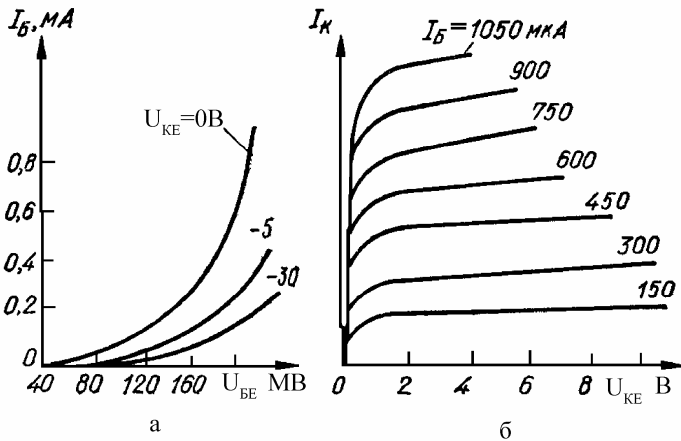


Рис. 116. Статичні характеристики біполярного транзистора для схеми з загальним емітером:
а – вхідна; б – вихідна

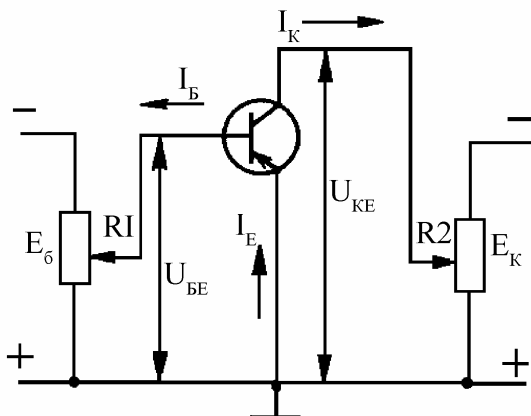


Рис. 117. Схема для зняття вольтамперних характеристик р-п-р транзистора, ввімкненого за схемою з загальним емітером

Таблиця 3

Порівняльні властивості різних схем вмикання транзисторів

Тип схеми	Підсилення			Опір	
	за напругою	за струмом	за потужністю	вхідний, Ом	вихідний, Ом
ЗБ	До 1000	<1	До 1000	Одиниці	Сотні тисяч
ЗЕ	>100	10...100	До 10000	Сотні	Десятки тисяч
ЗК	<1	>10	10	Десятки тисяч	Сотні

3. Польові транзистори: основні визначення, будова, принцип дії. Характеристики і параметри. Польовий транзистор – це керований триелектродний напівпровідниковий прилад, в якому струм створюється основними носіями зарядів (дірками або електронами) під дією поздовжнього поля, а керування ним здійснюється поперечним електричним полем керуючого електрода КЕ. За конструкцією діляться на польові транзистори із затвором у вигляді р-п переходу та з ізольованим затвором (МДН або МОН транзистори).

Основу польового транзистора із затвором у вигляді р-п переходу складає напівпровідникова пластина р або п – типу, що називають каналом, до торців яких приєднують виводи, один з якої

звуть витоком, а другий – стоком. З двох сторін на канал наносять напівпровідник відповідно **n** або **p**-типу, що відіграють роль затвора. Будову та схему вмикання транзистора наведено на рис. 118.

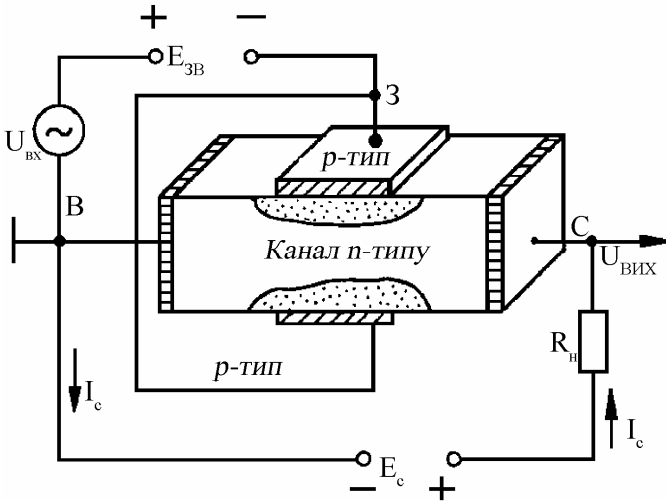


Рис.118. Польовий транзистор

Принцип дії транзистора – керування струмом каналу шляхом зміни поперечного перерізу каналу напругою затвора. Коли напруга на затворі U_3 дорівнює нулю, переріз каналу максимальний, його опір малий, струм через канал визначається величиною навантаження. З ростом U_3 переріз каналу зменшується, його опір росте, струм I_c спадає.

При певному U_c $I_c=0$, тобто транзистор закритий (режим відсічки). Якщо на вхід транзистора крім постійної напруги U_3 подати змінний вхідний сигнал $U_{вх}$, то поперечне електричне поле $U_3 \pm U_{вх}$ буде пульсуючим, змінюючи канал за законом вхідного сигналу, а значить у колі стоку на виході з'явиться підсилена змінна складова сигналу. На рис.119. наведено стокову $I_c=f(U_c)$ та стокозатворні $I_c=f(U_3)$ характеристики.

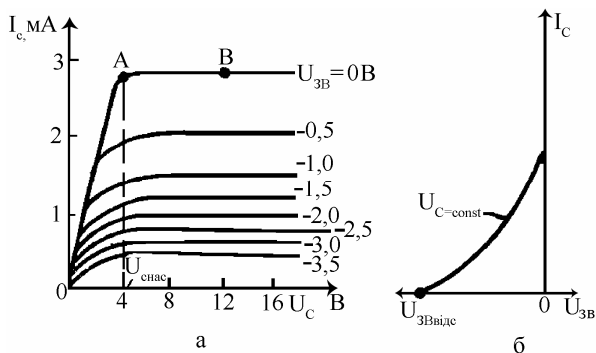


Рис. 119. Статичні характеристики польового транзистора з р-п-переходом:

*а – вихідна (стокова характеристика);
б – стокотворна характеристика (вхідна)*

Польовий транзистор з ізованим затвором має структуру: метал, діелектрик або оксид та напівпровідник. Тому їх часто називають МДН або МОН – транзисторами.

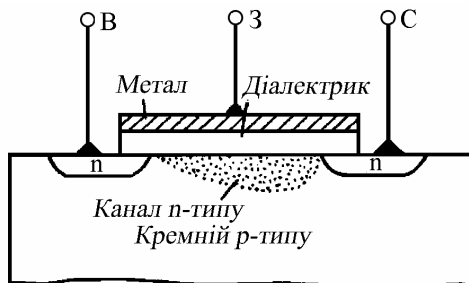


Рис. 120. Схематичне зображення польового транзистора з ізованим затвором

Як видно з рис. 120., основою приладу служить пластина кремнію р-типу, а областями витоку і стоку є області кремнію, леговані домішками n-типу. Між ними розташована вузька смужка кремнію n-типу (канал). Затвором служить металічна пластина, ізована діелектриком від каналу. Діелектриком може бути плівка двоокису кремнію SiO_2 .

Залежно від полярності напруги на затворі електрони провідності можуть виштовхуватися в об'єм підложки ($-U_3$), при цьому опір каналу зростає, струм спадає чи втягується в канал з підложки ($+U_3$), зменшуючи опір каналу та збільшуючи струм I_c . Напругу U_c , при якій настає насичення, звать напругою насичення $U_{нас.}$ (при цьому I_c майже не зростає).

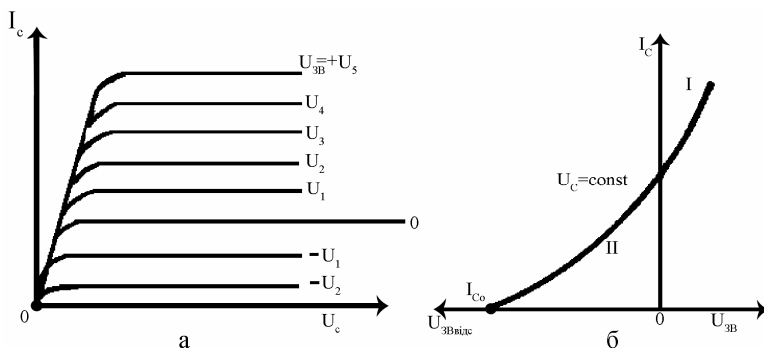


Рис. 121. Характеристики польового транзистора з ізованим затвором:
а – вихідна стокова; б – вхідна стокозатворна;
I – режим збагачення; II – режим збіднення

На відміну від польового транзистора з **p-n** переходом, струм стоку I_c проходить у I і II квадратах (у транзистора з **p-n** переходом I_c розміщений у II квадратах), що видно з графіків (мал. 121.).

Переваги польових транзисторів: великий вхідний опір; малий рівень шумів; стійкі проти радіації та дії температури; малі габарити.

Контрольні запитання

1. Дати визначення терміну “біполярний транзистор”.
2. Будова біполярного транзистора.
3. Пояснити принципи дії транзистора.
4. У чому підсилювальні властивості транзистора?
5. Зарисувати схеми вмикання транзисторів, показати на них струми I_k , I_c , I_b .
6. Основні порівняльні властивості різних схем вмикання транзисторів.
7. Які галузі застосування транзисторів?

-
8. Які є типи польових транзисторів?
 9. Будова польового транзистора з **p-n** переходом.
 10. Навести схему вмикання польового транзистора для зняття його характеристик $I_c=f(U_c)$; $I_c=f(U_g)$.
 11. Як працює транзистор з ізольованим затвором?
 12. Які переваги польових транзисторів перед біполярними транзисторами?
 13. Умовні позначення транзисторів.

2.4. ТИРИСТОРИ

1. Тиристор, будова та принцип дії, параметри і характеристики.
2. Різновиди тиристорів: диністор, триністор, симістор. Галузі застосування.
3. Системи позначень напівпровідникових приладів.

1. Тиристор, будова та принцип дії, параметри і характеристики. Перші промислові тиристори з'явилися в 1957 р. в силу їх малих габаритів, маси, високого к.к.д., довговічності, здатності працювати при значних струмах, напругах.

Їх основна властивість – здатність знаходитись у двох стійких станах: відкритому, пропускаючи струм, та закритому – практично не пропускаючи його.

2. Різновиди тиристорів: диністор, триністор, симістор. Галузі застосування. За будовою, роботою тиристори діляться на диністори, триністори, симістори, що виготовляються з кремнію. Загальна їх властивість – нелінійна вольт-амперна характеристика з ділянкою від'ємного опору.

Диністор – це прилад некерований з трьома **p-n** переходами, двохелектродний, що буває у двох станах – відкритому та закритому, крайні області зуть емітерами, а середні **p** і **n** базами.

У слабколеговану пластину кремнію з **n**-провідністю з двох сторін методом дифузії вводять домішки алюмінію та бору, утворюючи шар **p₁**, **p₃**, **p** – провідності. Сфера **p₂** складається з вихідного матеріалу, а найтонший шар **n₄** утворюється дифузією атомів фосфору в шар **p₃** на глибину до 20 мкм. До емітерних областей приєднані виводи – анод і катод. Переходи Π_1 і Π_3 називають емітерними, а Π_2 – колекторним. Схему вмикання диністора наведено на рис. 122, а його характеристика – на рис. 123.

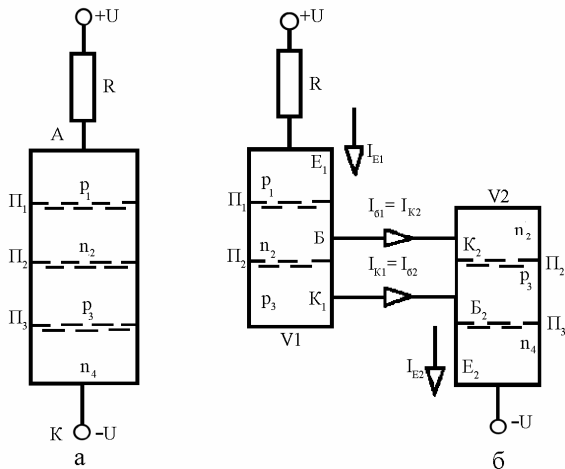


Рис. 122. Схема вмикання диністора:
а – будова; б – еквівалентна транзисторна модель диністора

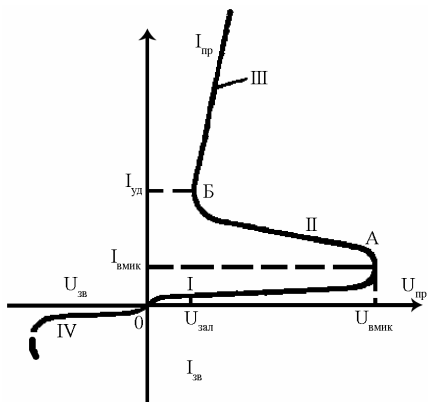


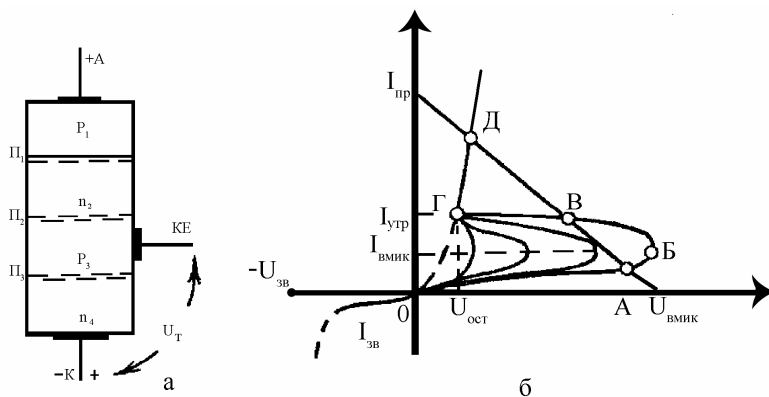
Рис. 123. Вольт-амперна характеристика диністора

Як видно із схеми, переходи Π_1 , Π_3 – відкриті, тобто мають низькі потенціальні бар'єри та опір, а р-n перехід Π_2 – закритий, тобто зміщений у зворотному напрямі, маючи високий потенціальний бар'єр та опір. У силу цього всю зовнішню напругу буде прикладено до закритого переходу Π_2 . Під дією поля із областей p_1 і n_4 через переходи

Π_1, Π_3 будуть направлятися дірки з p_1 в n_2 і електрони з n_4 в p_3 , від чого опір переходу Π_2 зменшується, виникає лавинний процес швидкого відкриття диністора. Відкритим диністор знаходиться доти поки його струм буде не менший від струму утримання $I_{\text{утр}}$. Допустимий струм диністора визначається опором R_n . Відключення диністора спостерігається за умови $I_{\text{дин}} < I_{\text{утр}}$ і подальшим зміщенням переходу Π_2 в зворотному напрямку. При зміні полярності вмикання диністора прилад залишається закритим, так як переходи Π_1, Π_3 будуть під зворотною напругою.

Триністор – це керований, триелектродний прилад з трьома **p-n** переходами односторонньої провідності. Керуються по аноду або катоду.

Розрізняють триністори запірні і незапірні. У незапірних триністорах керуючий електрод тільки відкриває його, тобто переводить із закритого стану у відкритий, у запірних – керуючим електродом відкривають, закривають триністор.



*Рис. 124. а – будова незапінного триністора;
б – характеристики роботи триністора*

Як видно з рисунка, крім анода і катода триністор має керуючий електрод KE, що приєднується до **p** чи **n** області. Ефект керування пояснюється тим, що із збільшенням струму керування зростає один з емітерних струмів, що видно з характеристики триністора $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{вкл}})$. Якщо струм $I_{\text{кер}} = 0$, то триністор веде себе як диністор (точка Б

графіка). При збільшенні $I_{кер}$ триністора напруга вмикання зменшується.

Якщо при відкритому триністорі зняти керуючу напругу, триністор залишиться відкритим, доки прямий струм $I_{пр}$ не стане менше від струму утримання $I_{утр}$ (точка Г на графіку). Цей струм називають струмом вимикання. Напруга керування величиною 1–5 В практично не залежить від $I_{пр}$, тому коефіцієнт підсилення $K_p = 10^4 \dots 10^7$.

Запірні триністори відрізняються від незапірних тим, що можуть переключатися із відкритого стану у закритий сигналом у колі керування (КЕ). Керуючий електрод розподілений по всій площі між шарами p_3 і катодним n_4 для прискорення розсмоктування носіїв електричним полем керуючого сигналу.

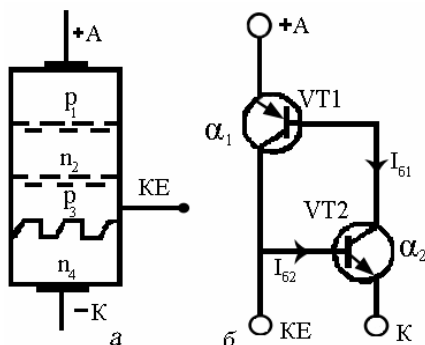


Рис. 125. Будова і транзисторна модель триністора:
а – конструкція; б – еквівалентна транзисторна модель триністора

Триністор закривається, коли сума коефіцієнтів передачі струмів емітера $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$, тобто кожен з транзисторів VT1 і VT2 своїм колекторним струмом збуджує інший транзистор, і коли петлевий коефіцієнт передачі $\beta_1 \beta_2 \geq 1$, обидва транзистори відкриваються, насичуються, оскільки $\beta_1 \beta_2 \geq 1$ рівносильне $(\alpha_1 + \alpha_2) \geq 1$.

Керуються тиристори сигналами прямокутної форми. У запірних триністорах $I_{кер}$ більший, ніж у незапірних.

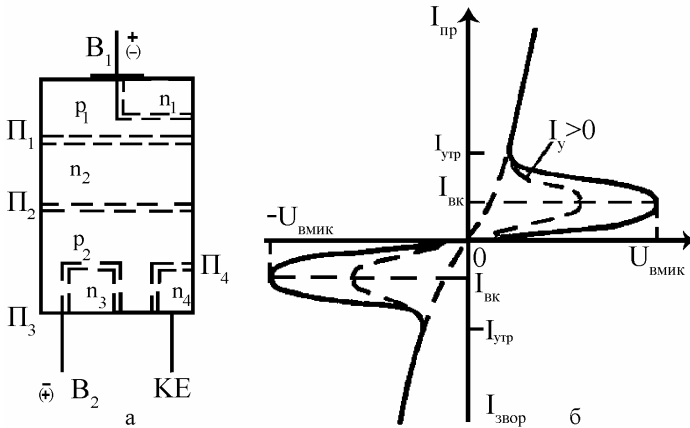


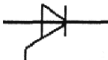


Рис. 126. Будова і вольт-амперна характеристика симістора

До симісторів належить група так званих симетричних тиристорів, керованих, еквівалентних двом триністорам, ввімкнених зустрічно-паралельно, що закриваються, відкриваються напругою керування будь-якої полярності і проводять струм в обох напрямках. Розроблені **p-n-p-n-p** та **n-p-n-p-n** структур симістори, в яких кожен з електродів (анод, катод та керуючий електрод) шунтує одночасно дві **p, n** області, що показано на рис.126. Якщо прикласти до електрода V_1 додатній потенціал, до V_2 і KE – від’ємний відносно V_2 , то електрони області n_4 інжектують через перехід Π_4 і збагачують сферу P_2 . Потенціальний бар’єр закритого переходу Π_2 знижується і від електрода V_1 до V_2 проходить прямий струм $I_{пр}$. При змінній полярності на V_1 і V_2 від’ємний потенціал KE забезпечує зміщення переходів Π_2, Π_3 у прямому напрямку, а закритий на початку перехід Π_1 відкривається під дією електронів області n_1 . Через симістор проходить струм у протилежному напрямку. Якщо на керуючому електроді KE буде додатній потенціал при (-) на V_1 і (+) на V_2 , попередньо закритий перехід Π_2 відкриється інжекцією електронів із області n_3 , обумовлюючи струм симістора.

3. Системи позначень напівпровідникових приладів.

<i>Назва</i>	<i>Графічне позначення</i>
Диністор	
Тиристор, який керується: за катодом	
за анодом	
симістор	

Контрольні запитання

1. Пояснити будову, дати визначення діодних тиристорів (диністорів).
2. Який принцип дії диністорів?
3. Навести вольт-амперні характеристики диністора.
4. Дати визначення тріодного тиристора та їх відмінності від диністорів.
5. Класифікація тиристорів тріодних.
6. Робота, характеристика тріодного тиристора незапірного.
7. Як працює запірний тиристор тріодний?
8. Пояснити односторонню провідність триністорів.
9. Як працює симістор?
10. Як замінити симістор триністорами?
11. Яке застосування диністорів, тримісторів, симісторів?
12. Умовні позначення диністорів, тримісторів, симісторів.

2.5. ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИЛАДИ

1. Загальні відомості про види фотоелектрів.
2. Фотоелектричні напівпровідникові прилади: фотодіоди, фототранзистори, фототиристри, фоторезистори.
3. Оптоелектронні напівпровідникові прилади: світловий діод, оптопари.
4. Системи позначень фотоелектричних і оптоелектронних приладів.

1. Загальні відомості про види фотоелектрів. До фотоелектричних приладів належать прилади вакуумні, напівпровідникові, в яких під дією електромагнітного випромінювання світла в результаті зовнішнього чи внутрішнього фотоелектричного ефекта змінюються електричні параметри (струм, опір чи виникає е.р.с.).

В основному розглянемо напівпровідникові прилади, які сприймають фотопотік, або генерують видимі електромагнітні хвилі та прилади, на зажимах яких виникає фото-е.р.с.

Розрізняють два види фотоелектричного ефекта: зовнішній та внутрішній.

При зовнішньому фотоелектричному ефекті пучком світла опромінюється речовина, виникає фотоелектронна емісія – явище виходу електронів із речовини за рахунок енергії світла. За законом Столетова фотострум дорівнює

$$I_{\text{ф}} = k\Phi, \text{ мА},$$

де k – інтегральна чутливість фотокатода;

Φ – світловий потік, лм.

Внутрішній фотоелектричний ефект базується на виникненні пар електронів і дірок під дією квантів світла, від чого змінюється концентрація вільних носіїв зарядів, а значить електричні властивості напівпровідника чи діелектрика, або виникає фото-е.р.с.

2. Фотоелектричні напівпровідникові прилади: фотодіоди, фототранзистори, фототиристри, фоторезистори. *Фотодіод* – напівпровідниковий діод з **p-n**-переходом, в якому падаючий фотопотік викликає появу е.р.с. на його виводах, у результаті переходу неосновних носіїв з **p**-області електронів у **n**-сферу і дірок з **n**-області в **p**-сферу.

При замиканні освітленого фотодіода на навантаження $R_{\text{н}}$, у колі виникає фотострум $I_{\text{ф}}$. Такий режим роботи діода є генераторним і їх називають фотоелементами або сонячними батареями, фотодіод-

ними фотоелементами. Виготовляють з германію, кремнію, селену тощо (рис.127).

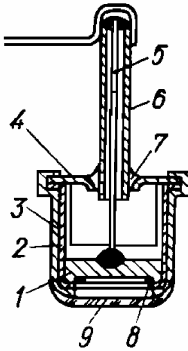


Рис. 127. Будова фотодіода:
 1 – кристал германію з р-п переходом;
 2 – кристалотримач; 3 – корпус з металу; 4 – кільце; 5 – вивід;
 6 – металева трубка; 7 – скляний ізолятор; 8 – олов'яне кільце;
 9 – скляна лінза

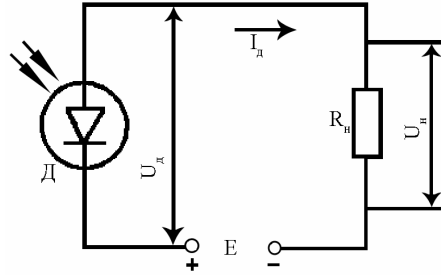


Рис. 128. Схема вмикання фотодіода (фотодіод ввімкнений у зворотному напрямку)

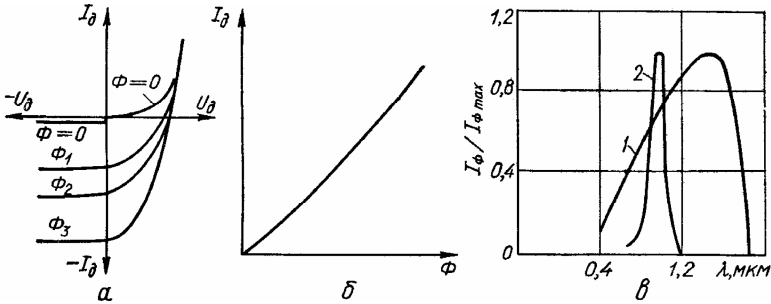


Рис. 129. а – вольт-амперна характеристика фотодіода; б – світлова; в – спектральна (1 – германевий фотодіод; 2 – кремнієвий фотодіод)

Фотодіод в режимі фотоперетворювача вмикається послідовно з навантаженням у зворотному напрямі, тому при освітленості фотодіода його зворотний струм зростає в результаті генерації електронів і дірок. При затемненні фотострум фотодіода різко зменшується, що видно з його вольт-амперної характеристики. Їх використовують в кіноапаратурі, реєструючих та вимірювальних приладах фотометрії.

Деякі типи фотодіодів:

ФД-1; $U_p=15$ В; $I_T=30$ мкА;

ФД-27К; $U_p=20$ В; $I_T=1$ мкА.

Фототранзистор – це тришаровий з двома переходами напівпровідниковий прилад, що має властивості підсилення фотоструму під дією електромагнітного випромінювання світла. Виготовляються як правило площинні з германію, кремнію і бувають біполярні та польові фототранзистори.

Так біполярний фототранзистор може вмикатись у коло без бази. Тоді під дією світла в області бази утворюються пари носіїв зарядів – електрони та дірки. У **p-n-p** фототранзисторі дірки з емітера попадають у сферу колектора, утворюючи фотострум, а електрони, що залишились у базі, створюють просторовий заряд, знижуючи висоту потенціального бар'єра емітерного переходу, а значить збільшують ріст фотоструму через навантаження.

Під час використання бази фототранзистора на його вхід подають електричний сигнал та світловий, від чого його чутливість зростає.

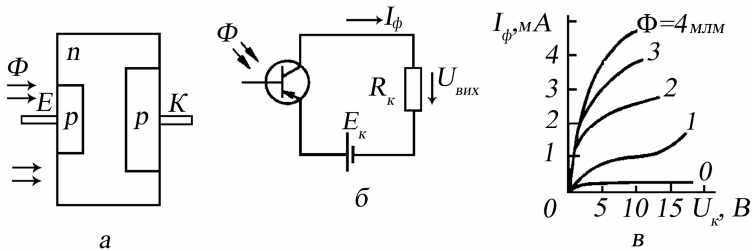


Рис.130. Будова, схеми вмикання, характеристики фототранзисторів:
а – будова фототранзистора; б – схема вмикання; в – вольт-амперні характеристики біполярного фототранзистора

Типи фототранзисторів:

ФТГ – 3 $U_p=5$ В; $I_r=50$ мкА;

$T=-60\dots+45^{\circ}\text{C}$.

ФТ – 2К $U_p=5$ В; $I_r=3$ мкА.

Фототиристор – це тиристор, в якому використовують фотоелектричний ефект. Керується світловим потоком і застосовується для комутації світловим сигналом електричних сигналів великої потужності.

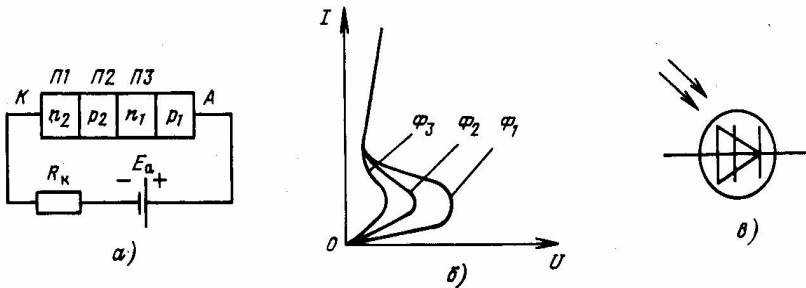


Рис. 131. Схема вмикання, характеристики фототиристора:

а – схема вмикання фототиристора; б – вольт-амперна характеристика;

в – умовне графічне зображення фототиристора

Якщо відсутнє світло і $I_{кер}=0$, прилад закритий і через нього протікає невеликий темневий струм. При освітленні фототиристора утворюються пари електроні-дірки, а значить фотострум. У базах p_2 і n_1 зростають емітерні струми і фототиристор відкривається.

Так що основна відмінність фототиристорів в тому, що в фототиристорах коефіцієнти передачі струму α являються функцією освітленості.

Фоторезистори – це фотоелектричний напівпровідниковий приймач випроміненого світла, опір якого залежить від величини освітленості (фотопотоку) складається з тонкого напівпровідника з двома електродами. Поверхня напівпровідника (сульфіт свинцю, з'єднання сірчаного кадмію, вісмуту) покрита шаром прозорого лаку і знаходиться в пластмасовому або сталевому корпусі.

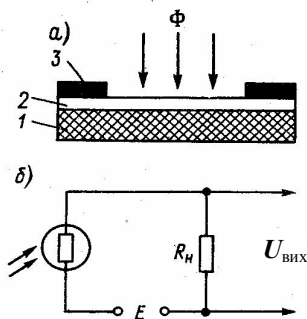


Рис. 132. Будова, вмикання фоторезистора:
a – будова фоторезистора: 1 – напівпровідник,
 2 – лак, 3 – корпус; *б* – схема вмикання

При відсутності світлового потоку $\Phi=0$ в колі проходить невеликий темневий фотострум. Опір фоторезистора великий ($10^2 \dots 10^{10}$ Ом). При освітленні фоторезистора за рахунок енергії квантів світла виникають вільні електрони провідності, дірки та іонізовані атоми речовини, оскільки виникає велика кількість носіїв заряду, росте провідність та струм фоторезистора, а опір зменшується, що видно з світлової $I_\Phi=f(E_{\text{лк}})$ та вольт-амперної $I_\Phi=f(U_a)$ характеристик.

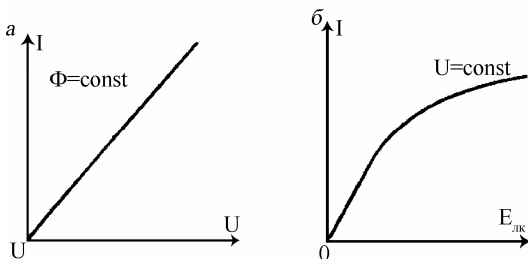


Рис. 133. Вольт-амперна (а) та світлова (б) характеристики фоторезистора

Випускають фоторезистори типів:

ФСК-1; $U_p=50$ В, $R_T=10^4$ Ом, $P=0,05$ Вт.

ФСД-1; $U_p=20$ В, $R_T=2 \times 10^5$ Ом, $P=0,02$ Вт.

3. Оптиелектронні напівпровідникові прилади: світловий діод, оптопарі. Світловипромінюючий діод – напівпровідниковий

діод, що випромінює енергію в видимій частині спектра в результаті рекомбінації електронів і дірок. Світло випромінюється **p-n**-переходом при проходженні через нього прямого струму.

Яскравість свічення залежить від густини струму, а колір світла – від ширини забороненої зони і типу напівпровідника. Тож якщо концентрація електронів в n-області більше ніж дірок в р-області, то електрони із n області проникають в р-сферу, рекомбінують з дірками бази. Рекомбіновані електрони переходять з більш високих орбіт на більш низькі орбіти. При цьому виникають фотони видимого світла.

Для світлодіодів застосовують матеріали: фосфід галію GaP і карбід кремнію SiC. Крім світлодіодів видимого світла випускають світлодіоди інфрачервоного випромінювання ІЧ та світлові діоди із змінним кольором світла, що мають два світловипромінюючі переходи.

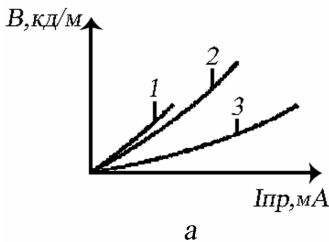


Рис. 134. Схема вмикання світлового діода

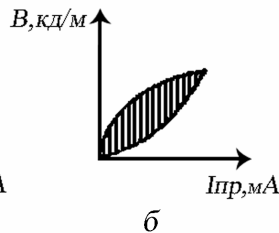


Рис. 135. Залежності $V=f(I_{пр})$ для світлодіодів типу АЛ-102

Типи фотодіодів:

АЛ102А $I=5\text{mA}$; $U_{пр}=3,2\text{ В}$;

АЛС317А $I_{пр}=12\text{mA}$; $U_{пр}=2\text{ В}$.

Оптрон – це напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, оптично між собою зв'язані. Оптопарі між собою відрізняються фотоприймачами і бувають: фоторезисторні, фотодіодні, фототранзисторні, фототиристорні тощо.

У резистивних оптопарах фотоприймачем служить фотоопір із сульфїду кадмію, а випромінювачем – мініатюрна лампочка розжарювання або світлодіод, узгоджені по спектральним характеристикам.

Застосовується для автоматичного регулювання підсилення, керування безконтактними подільниками напруг, формування різних сигналів тощо.

Типи оптопар: ОЕП-7, ОЕП-14.

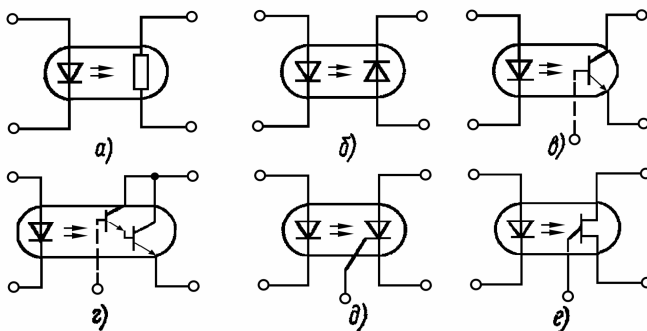


Рис. 136. Умовні позначення оптронів:

а – фоторезисторного; б – фотодіодного; в і е – складового фототранзисторного; г – фототранзисторного двобазового; д – фототиристорного

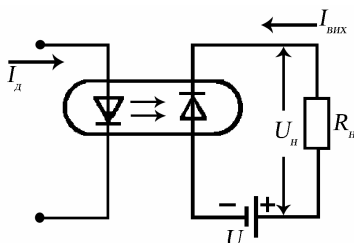


Рис. 137. Схема вмикання навантаження до фотодіодного оптрона

Транзисторні оптопари – фототранзистор + світловий діод, світло якого направлено на базу фототранзистора, що вмикається в коло із спільним емітером і працює в ключовому режимі.

Застосовуються в оптоелектронних реле, ключових комутаторах, схемах узгодження тощо.

Діодні оптопари – це кремнієвий фотодіод та інфрачервоний арсенідо-галієвий світлодіод, розмішених в одному корпусі. Фотодіод може працювати в фотогенераторному режимі з фото-е.р.с. та фотодіодному.

Діодні оптопари застосовують для створення імпульсних трансформаторів, що не мають обмоток, для керування роботою мікросхем на МДН структурі.

Тиристорні оптопари складаються з кремнієвого фототиристора як фотоприймача, що працює в ключовому режимі, та світлового діода. Запирається фототиристор шляхом зменшення зовнішньої напруги.

Застосовується в схемах формувачів імпульсів, гальванічної розв'язки кіл керування між собою тощо.

Деякі типи фотопар:

діодні АОД109А; $U_{\text{вх}}=1,5 \text{ В}$, $I_{\text{вх}}=10 \text{ мА}$; $V_{\text{вих}}=40 \text{ В}$;

транзисторні АОТ123Б; $U_{\text{вх}}=2 \text{ В}$, $I_{\text{вх}}=25 \text{ мА}$; $V_{\text{вих}}=30 \text{ В}$;

тиристорні АОУ103А; $U_{\text{вх}}=2 \text{ В}$, $I_{\text{вх}}=55 \text{ мА}$ $I_{\text{вих}}=100 \text{ мА}$

4. Системи позначень фотоелектричних і оптоелектронних приладів.

Умовні позначення фотоелектричних приладів

Фотодіод



Фотоелемент із зовнішнім фотоелементом



Фоторезистор



Фототиристор



Фототранзистор



Випромінюючий світлодіод



Контрольні запитання

1. Які прилади належать до фотоелектронних?
2. Пояснити зовнішній фотоэффект.
3. Пояснити внутрішній фотоэффект.
4. Яка будова та робота фоторезисторів?
5. Схема вмикання фоторезистора.
6. Дати визначення фотодіоду.
7. Привести схему вмикання фотодіода та її роботу.
8. Дати визначення фототранзистору.
9. Привести схему вмикання фототранзисторів.
10. Як працює фототранзистор?
11. Як працює фототиристор і схема його вмикання?
12. Будова та робота світлового діода.
13. Які прилади називають оптопарами?
14. Застосування оптопар.
15. Умовні позначення фотоелектричних приладів.

2.6. ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ, ЕЛЕМЕНТИ МІКРОМІНІАТЮРНОГО ВИКОНАННЯ

1. Пасивні елементи електричних кіл.
2. Резистори: їх різновиди, характеристики і параметри.
3. Конденсатори: їх різновиди, характеристики і параметри.
4. Котушки індуктивності, трансформатори. Характеристика трансформаторів за їх функціональним призначенням: силові, вихідні, узгоджуючі та імпульсні.
5. Мікромініатюризація елементної бази електронних схем.
6. Інтегральні мікросхеми: різновиди, технологія виготовлення.
7. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми.
8. Пасивні і активні компоненти.

1. Пасивні елементи електричних кіл. Пасивні елементи і компоненти ІС – резистори, конденсатори, індуктивності і внутрішньо-схемні сполуки. Резистори в тонкоплівкових ІС – це смужка чи плівка визначеної конфігурації, нанесена між двома контактами на діелектричній підставі (підкладці). Необхідний опір резистора досягається за рахунок вибору як геометричних розмірів плівки (ширини, довжини, товщини), так і матеріалу плівки. Плівку резисторів одержують осадженням пари

ніхрому, танталу, нітриду танталу чи суміші металів з діелектриком, які мають назву керметів. Застосування керметів забезпечує високий питомий опір, їх отримують із хрому і моноокису кремнію одночасним осадженням пари цих речовин на підкладку.

2. Резистори: їх різновиди, основні характеристики і параметри. Резистори – пасивні елементи електричного кола, що використовуються як електричний опір. Бувають резистори змінні і постійні. У постійних резисторах опір від моменту виготовлення не змінюється. У змінних резисторах опір можна змінювати згідно з вимогами за допомогою рухомого контакту.

Резистори виготовляють з дроту високоомного (манганін, ніхром, контантан тощо) та високоомної речовини, наприклад, вуглецю. Вони характеризуються номінальним опором, потужністю.

Останнім часом використовують напівпровідникові резистори – варистори, терморезистори.

Варистор змінює електричний опір при зміні прикладеної напруги. Його вольт-амперна характеристика нелінійна і симетрична, (рис. 138).

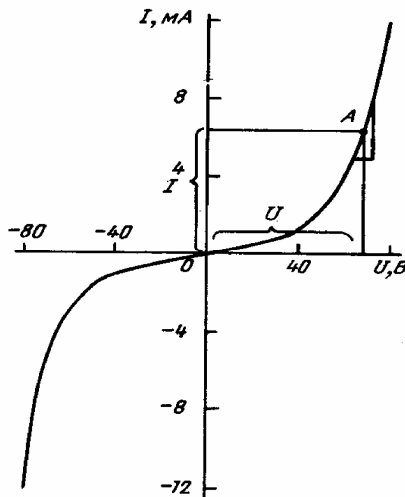


Рис. 138. Вольт-амперна характеристика варистора напівпровідникового (виготовляється з карбіду кремнію)

Основний параметр варистора – коефіцієнт нелінійності λ як відношення опору варистора постійного струму до його диференціального опору в заданій точці характеристики, тобто

$$\lambda = \frac{R}{R_d}, \quad (264)$$

де $R = \frac{U}{I}$ (Ом) $R_d = \frac{\partial U}{\partial I}$ (Ом) – визначається з характеристичного трикутника.

Для різних типів варисторів $\lambda = 2 \dots 6$ і чим більше λ , тим чутливішим він до зміни напруги. Захищає електричні кола від перенапруг.

Терморезистор – пасивний напівпровідниковий резистор, опір якого змінюється залежно від температури.

Розрізняють позистори – це терморезистори, опір яких збільшується із зростанням температури, і термістори, опір яких зменшується із зростанням температури.

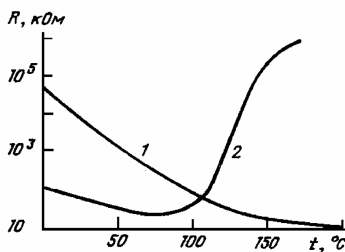
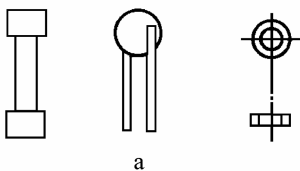


Рис. 139. Конструкція та температурна характеристика терморезисторів:
a – конструкція терморезисторів (1 – циліндрична; 2 – пошукова; 3 – кільцева.);
б – температурна характеристика (1 – термістора; 2 – позистора)

Матеріалом для них є напівпровідник **n**-типу із оксидів металу. Основна характеристика терморезистора – залежність $R=f(t)$ (рис. 139) та температурний коефіцієнт опору:

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \times \frac{\partial R_t}{\partial T}. \quad (265)$$

Знаходиться в межах $\alpha = -0,03 \dots 0,06$ (1/град.)

Терморезистори на високих частотах використовують як звичайні резистори, а більше – в схемах в ролі датчиків температури.

3. Конденсатори: їх різновиди, характеристики і параметри.

Конденсатори – елементи електричного кола, що використовуються як ємності.

Розрізняють конденсатори постійної та змінної ємності, і конструктивно виконуються з пластин двох і більше, між собою ізолюваних твердим, рідким чи газоподібним діелектриком.

Основний параметр його – електрична ємність. Для плоского конденсатора вона рівна

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{b} [\Phi], \quad (266)$$

де S – площа пластини;

b – відстань між пластинами;

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ [Ф/м] – діелектрична постійна;

ϵ – відносна діелектрична проникність діелектрика.

Також використовують параметри:

температурний коефіцієнт ємності (ТКЕ), номінальна напруга U_n , електричний опір ізоляції $R_{із}$, тангенс кута втрат конденсатора.

$$ТКЕ = \frac{\Delta C}{C} \times 100 / \Delta T (\%), \quad (267)$$

де ΔC – зміна ємності залежно від температури $\Delta T = T_2 - T_1$;
 $ТКЕ = \pm (30 \dots 50) \times 10^{-4} \%$,

$R_{із}$ – це опір ізоляції постійному струму. Характеризує якість діелектрика, величину струму, що проходить через нього, при U_n ,

$\text{tg } \theta$ – тангенс кута втрат, характеризує відношення активної потужності конденсатора до реактивної складової при змінному струмові.

Величина, зворотна до $\text{tg } \theta$, є добротність конденсатора θ_c . Конденсатор вважається нормальним, якщо $\theta_c \geq 1000$.

Залежно від матеріалу діелектрика конденсатори ділять на паперові, керамічні, слюдяні, оксидні тощо, а за виконуваними функціями – імпульсні, захисні, прохідні, роздільні тощо.

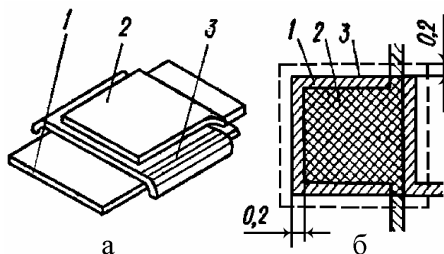


Рис. 140. Конденсатор плівковий:

*а – загальний вигляд; б – рисунок (1 – нижня обкладинка;
2 – верхня обкладинка; 3 – діелектрик)*

Найбільшу ємність при відносно малих габаритах мають оксидні (електролітичні) конденсатори $C \sim 22000 \text{ мкФ}$.

Основна одиниця вимірювання ємності – Фарада (Ф), застосовують для розрахунків: $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ мкФ}$.

Для одержання конденсатора потрібної ємності їх з'єднують паралельно, послідовно. Деякі типи конденсаторів:

КДК – конденсатор дисковий керамічний;

КТК – конденсатор трубчастий керамічний;

МБМ – металопаперовий малогабаритний.

Як правило, на корпусах позначають тип конденсатора, напругу U_n та ємність C_n .

4. Котушки індуктивності, трансформатори. В електричних пристроях використовують в основному однофазні трансформатори потужністю до 4 кВА. Це трансформатори силові, вихідні, узгоджуючі, імпульсні. Силові трансформатори вмикають у мережу для живлення електронної апаратури. Складаються з магнітопроводу, на якому розміщують первинну і вторинні обмотки. Котушки індуктивності виготовляють з осердям і без нього.

Вихідний трансформатор узгоджує повний опір каскаду електронної апаратури з повним опором навантаження, а узгоджуючий – узгоджує різні повні опори електричних кіл при передачі електричних сигналів, між каскадами.

Наведемо деякі співвідношення в трансформаторі:

$n = U_1/U_2 = I_2/I_1 = W_1/W_2$ – так визначають коефіцієнт трансформації;

$R_2 = U_2/I_2$, Ом – навантаження вторинної обмотки;

$U_1/I_1 = n \times U_2/I_2 / n = n^2 \times U_2/I_2 = n^2 \times R_2$, а значить $R_1 = n^2 \times R_2$, Ом.

Так що за рахунок трансформатора узгоджують вихідний опір з боку первинної обмотки з опором навантаження або вхідним опором наступного каскаду.

Імпульсні трансформатори служать для передачі, перетворення, формування імпульсних сигналів. Магнітопровід у них повинен мати малі втрати на перемагнічування, вихрові струми, тому їх виготовляють з феритів, оксиферів, пермалою.

Імпульсний трансформатор – це фазозсуваючий елемент в імпульсних генераторах з трансформаторним зворотним зв'язком (у блокінг-генераторах), запам'ятовуючим елементом оперативного пристрою електронних машин.

5. Мікромініатюризація елементної бази електронних схем.

Мікроелектроніка – напрям електроніки, який з допомогою комплексу фізико-хімічних, технологічних, схемотехнічних методів вирішує проблему створення надійних, економічних елементів і пристроїв.

У процесі мікромініатюризації апаратури вирішують завдання зменшення маси, об'єму шляхом використання малогабаритних дискретних елементів (резисторів, конденсаторів, діодів тощо), об'єднаних у функціональні вузли-модулі.

Сучасна мікроелектроніка розвивається в трьох напрямках, – зв'язаних зі створенням, удосконаленням гібридних, напівпровідникових мікросхем та функціональних пристроїв.

Основним мікроелектричним виробом з великою густиною монтажу, що застосовується при цьому як одне ціле, є мікросхема. У мікросхемі входять пасивні та активні елементи.

6. Інтегральні мікросхеми: різновиди і технологія виготовлення. Інтегральна мікросхема – це мікроелектронний виріб для виконання певних функцій перетворення, обробки сигналів і розглядається як одне ціле.

Складається з активних елементів – напівпровідникових діодів, транзисторів тощо та пасивних елементів – резисторів, конденсаторів, дроселів, проводів, електрично пов'язаних між собою.

Переваги інтегральних мікросхем порівняно з аналогічними схемами на дискретних елементах: мала маса та розміри, висока надійність, економічність, можливість автоматизації виробництва. Мікросхеми за конструктивно-технологічними ознаками ділять на напівпровідникові, плівкові, гібридні.

У напівпровідникових інтегральних мікросхемах (ІС) пасивні і активні елементи виконують в одній напівпровідниковій пластині кремнію. У плівкових ІС ці елементи являють собою плівки, нанесені на діелектричну основу – підложку. У гібридних ІС пасивні елементи, провідники виготовляють у вигляді плівок, нанесених на діелектричну основу, активні елементи – безкорпусні діоди, транзистори входять у склад мікросхеми як компоненти.

Залежно від функціонального призначення ІС ділять на аналогові і цифрові. Аналогові ІС перетворюють і обробляють сигнали, що змінюються за законом безперервної функції, а цифрові ІС перетворюють і обробляють сигнали, виражені в двійковому чи іншому коді.

Складність ІС характеризується кількістю елементів і компонентів у ній. При цьому ступінь інтеграції визначається такою формулою:

$$k = \lg \times N, \quad (268)$$

де N – кількість елементів, компонентів мікросхеми;

k – ціле число $k \geq 1$.

Залежно від величини N розрізняють степені інтеграції – мала, середня, велика. У сучасних гібридних ІС пасивні елементи виготовляють послідовним нанесенням на основу плівок з різних матеріалів, а активні елементи виготовляють як дискретні в мініатюрному чи безкорпусному оформленні. Залежно від товщини плівки розрізняють товстоплівкові (1–25 мкм) та тонкоплівкові – до 1 мкм.

Основні конструктивні елементи гібридної ІС: основна (підложка), на якій розміщуються активні і пасивні елементи; пасивна частина з розміщенням в одній площині пасивних елементів; навісні безкорпусні діоди, транзистори з виводами; навісні пасивні елементи (конденсатори великої ємності, дроселі, трансформатори); корпус для розміщення і герметичності мікросхеми.

Як підложки використовують скло, кераміку, що мають великий опір, міцність, хімістійкість. Підложка характеризується довжиною l (4–48 мм), шириною b (2,5–30 мм), товщиною S (0,6; 1,0; 1,6 мм).

Провідниками з'єднують окремі елементи між собою, а контактні майданчики з'єднують плівкові, навісні елементи з провідниками та для зовнішніх зв'язків.

Для наплення провідників, майданчиків використовують золото, срібло, мідь, нікель, алюміній. Провідники між собою ізолюють монооксидом кремнію, чи спеціальним склом.

Резистори плівкові виготовляють з хрому, ніхрому, танталу, металокераміки прямокутної форми (рис. 141).

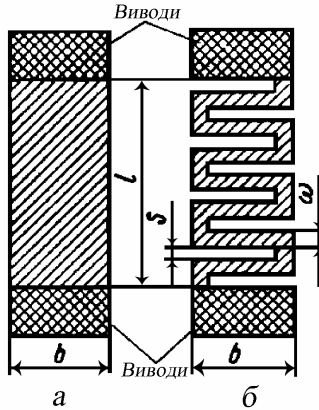


Рис. 141. Конструкція плівкового резистора

Опір резисторів визначають за формулою

$$R = \frac{\rho l}{bh} \text{ Ом}, \quad (269)$$

де ρ – питомий опір плівки резистора, Ом/см;

b – ширина резистора, см;

h – товщина плівки, см.

Як правило R знаходять, якщо ширину b виразити так:

$$b = lR_s = \frac{\rho}{h} \text{ см}, \text{ а } R = R_s \cdot N, \text{ Ом} \quad (270)$$

де R_s – поверхневий питомий опір (опір одиниці площі плівки Ом/С);

N – кількість майданчиків.

Вихідні дані розрахунку опорів: задана величина опору, Ом; потужність розсіювання P , Вт; допустима питома потужність плівки, $P_{\text{пит}}$; мінімальна ширина плівки.

Опір резисторів лежить у межах 50 Ом...10 МОм, напруга робоча до кількох сот вольт, частота – кілька сот мегагерц.

Конденсатори складаються з двох металевих обкладок, розділених діелектриком. Обкладками служать золото, срібло, тантал тощо, а діелектриком – монооксид кремнію SiO_2 , германію GeO_2 , танталу Ta_2O_5 й інші. Ємність конденсатора знаходять за такою формулою:

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon S}{d} \text{ пФ}, \quad (271)$$

де S – площа обкладок, см^2 ;

d – товщина діелектрика, см .

Розрахунок плівкових конденсаторів при відомій товщині d та C_n зводиться до визначення S

$$S = C_n / C_0.$$

Індуктивності виготовляють у вигляді одношарової спіралі із золота квадратної форми (одиниці $\text{мкГн}/\text{см}^2$). Так, наприклад, індуктивність 10 мкГн складається з 46 витків шириною $0,05 \text{ мм}$, розмірами $15 \times 15 \text{ мм}$. Часто індуктивності виготовляють дискретно з осердям феритовим.

Безкорпусні напівпровідникові прилади, як активні елементи, використовують дискретні з виводами гнучкими або жорсткими. Контакт забезпечують за рахунок тепла і тиску або ультразвукової зварки і тиску.

Для виводів застосовують мідь, срібло, покриті спеціальними смолами, лаками, емаллю тощо.

7. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми. На відміну від гібридних ІС, що складаються з плівкових і навісних елементів, напівпровідникові ІС – це один кристал напівпровідника, в якому формують пасивні, активні елементи, необхідні з'єднання, ізоляцію одночасно за груповим методом та планарними технологіями. При груповому методі на пластині напівпровідника одночасно виготовляють групу однотипових напівпровідникових приладів, після чого їх розрізають і направляють на машину функціональних вузлів. Основними процесами створення компонентів напівпровідникових ІС є технологічні процеси формування **p-n**-переходів, з яких потім формують активні, пасивні елементи – транзистори, діоди, резистори тощо.

Такими процесами є дифузія домішок у кремній і епітаксійне нарощування монокристалічних шарів кремнію на кремнієву основу з протилежним типом провідності.

Взагалі розрізняють такі технології виготовлення мікросхем: планарна, епітаксійно-планарна, суміщена, коли активні елементи виготовляють по планарній технології в об'ємі напівпровідника, а пасивні елементи – методом тонкоплівкової технології. Також роль ізоляції можуть відігравати сформовані додаткові **p-n** переходи (рис. 142), а не тільки двооксид кремнію SiO_2 .

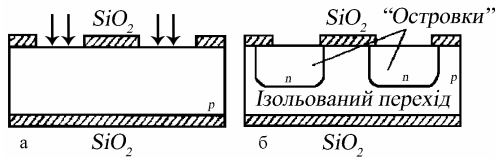


Рис. 142. Процес формування ізольованих р-п переходів:
 а – пластина кремнію з кисневою плівкою; б – пластина кремнію після дифузії домішок і утворення “островків”

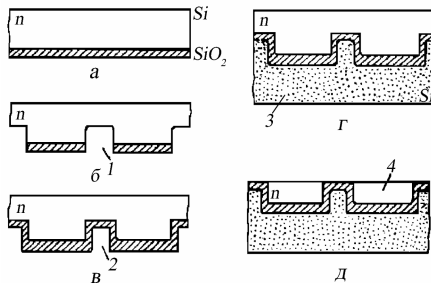


Рис. 143. Утворення “островків” використанням ізолюючого прошарку:
 а – утворення плівки SiO_2 ; б – травлення канавок у плівці SiO_2 ; в – утворення фізурного шару SiO_2 ; г – нарощування шару полікристалічного кремнію власної провідності; д – утворення “островків” для формування елементів схеми

Найскладніші для виготовлення напівпровідникових ІС є транзистори польові та біполярні. Технологія застосовується при цьому планарна і епітаксійно-планарна.

При дифузії донорної домішки у вихідній пластині утворюється колекторний перехід, а при повторній дифузії акцепторної домішки одержують сферу бази. Третя дифузія веде до утворення області емітера. Подібним способом виготовляють сукупність кількох **п-р-п** транзисторів із загальною базою, колектором і 5...8 емітерів, тобто багатоемітерного транзистора.

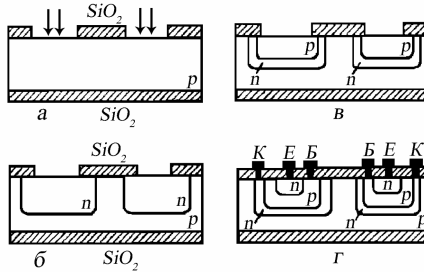


Рис.144. Виготовлення біполярних транзисторів методом планарно-дифузійної технології:
а – дифузія донорних домішок; *б* – формування “островків”;
в – повторна дифузія акцепторних домішок і формування бази;
г – утворення емітерної області і контактних майданчиків

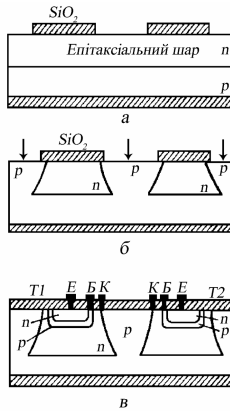


Рис. 145. Виготовлення біполярних транзисторів епітаксійно-планарною технологією:
а – нарощування шару кремнію *n*-типу на високоомну основу *p*-типу;
б – пластина кремнію після ізолюючої дифузії; *в* – те ж, але після дифузії бази, емітера і утворення контактів

При виготовленні польових транзисторів по планарній технології кількість операцій значно скорочується.

Напівпровідникові діоди також виготовляють методом планарної технології одночасно з транзисторами, використовуючи при цьому один або два **p-n**-переходи його.

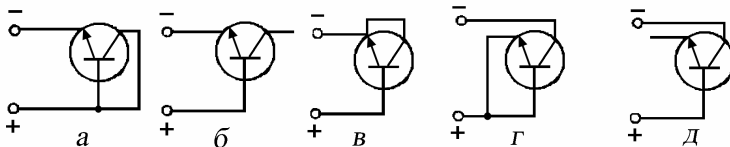


Рис. 146. Варіанти використання біполярних транзисторів як діодів:
а, б – використання переходів емітер-база; в – паралельне вмикання р-п-переходів; г, д – використання колекторно-базових переходів

Резистори в напівпровідникових ІС виготовляють методом дифузії домішок в островки епітаксійного шару кристала кремнію. Причому формування резисторів проходить одночасно з формуванням емітера і бази транзисторів. Діапазон номіналів резисторів при цьому 10 Ом...50кОм з допуском $\pm 20\%$, робоча частота 10...20 МГц, при допустимій напрузі на них близько 20 В.

Як конденсатор в напівпровідникових ІС використовують бар'єрну ємність р-п-переходу, яка формується в островках пластини кремнію одночасно з формуванням транзисторів способом дифузії. При цьому р-п-перехід вмикається у зворотному напрямку, використовуючи р-п-переходи емітер-база, колектор-база тощо (рис. 147).

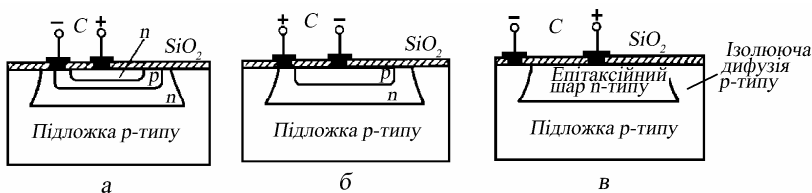


Рис. 147. Конструкція конденсаторів інтегральних схем на основі р-п переходів:
а – емітер-база; б – колектор-база; в – колектор-підложка

Виготовлення індуктивностей у напівпровідникових ІС являється досить складним, тому для цього штучно створюють схеми, що реалізують індуктивний ефект (струм відстає від напруги за фазою).

Такими елементами можуть бути реактивні транзистори, в яких струм колектора відстає від напруги на колекторі по фазі на 90° . Але це індуктивності величиною кілька мікрогенрі, тому часто застосовують навісні мініатюрні котушки індуктивності.

8. Пасивні і активні компоненти. Властивості елементів тонкопліткових ІС багато в чому залежать від якості підкладки, виконаної зі скла, кераміки чи пластмаси. До мікронерівностей поверхні підкладки ставлять жорсткі вимоги; їхній розмір не повинен перевищувати 1,5 мкм. У напівпровідникових ІС роль резистора виконує об'ємний опір ділянки монокристалу напівпровідника, в обсязі якого виготовляють ІС. Кристал у цьому випадку є підкладкою. Для одержання необхідного номіналу резистора розміри відповідної ділянки, а також його провідність повинні мати суворо визначені значення. Найчастіше резистори отримують локальною дифузією домішок через маску, що обмежує зону резистора. Резистори, отримані за допомогою дифузійної технології, називаються дифузійними. На рис. 148 показано інтегральний плівковий резистор, отриманий за допомогою дифузійної технології. Кінці резистивного елемента з'єднуються з плівковими контактними майданчиками 2, виконаними з металу (алюміній, мідь, золото), нанесеного на підкладку 3.

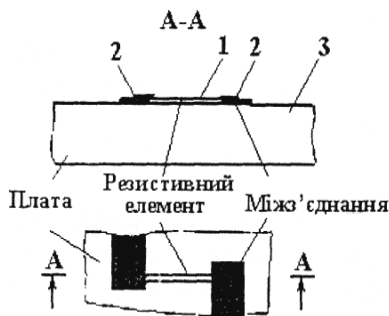


Рис. 148. Інтегральний плівковий резистор
1 – резистивний елемент;
2 – площа; 3 – підкладка

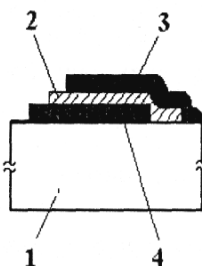


Рис. 149. Інтегральний плівковий конденсатор:
1 – плата; 2 – діелектрик;
3, 4 – металеві шари

Електричний опір дифузійних резисторів може бути від 10 Ом до 1 МОм. Відхилення опору від номіналу – 5–10%. Температурний коефіцієнт опору $\alpha=(50-500)^{\circ}10^{-4}$ град. Завдяки малій власній індуктивності тонкоплівкові дифузійні резистори мають частотний діапазон до 1000 МГц.

Конденсатори виконуються на діелектричній підкладці послідовним напилюванням трьох шарів: метал–діелектрик–метал (рис. 149). Металеві шари 3, що утворюють обкладки конденсатора, напилюють

звичайно з алюмінію; як діелектрик 2 використовують оксид кремнію, оксид алюмінію, боросилікатне скло й ін. Ємність такого конденсатора залежно від площі обкладок, товщини і діелектричної проникності діелектрика становить 100–500 пФ при робочій напрузі до 60 В. Температурний коефіцієнт ємності $TKE = (35-400) \cdot 10^{-6} / \text{град}$, частотний діапазон 300–500 МГц.

Індуктивні елементи можуть бути виконані у вигляді одношарових багатовиткових спіралей, однак індуктивність їх не перевищує 20 мкГн при добротності не більш 50, тому подібні елементи знаходять мале застосування в мікросхемах.

Добротність індуктивності

$$Q_L = P_L / P_R,$$

де P_L – реактивна потужність котушки індуктивності, Вт; P_R – активна потужність, що розсіюється на активному опорі котушки R, Вт.

Для виготовлення трансформаторних елементів з індуктивністю більше ніж 20 мкГн немає розробленої технології, тому в ІС, де необхідно використовувати котушки з великими індуктивностями чи трансформатори, ці елементи роблять начіпними. тобто мікросхеми доповнюються індуктивними компонентами. На базі плівкової технології дотепер не вдається створити досить надійні транзистори і діоди, тому плівкові мікросхеми мають обмежене самостійне застосування і здебільшого складають пасивну основу гібридних мікросхем.

На рис.150,а подано загальний вигляд плати гібридної інтегральної мікросхеми, що представляє собою схему транзисторного підсилювача. На діелектричну підкладку наносяться через трафарет резистивні смужки R_1, R_2, R_3 з високоомного матеріалу; потім через інший трафарет розпиленням металу, що має високу електропровідність, наносять нижню обкладку O_1 конденсатора С, між'єднання і контактні площадки 1–5, потім через третій трафарет наноситься плівка діелектрика конденсатора Д, а через четвертий трафарет останній шар – верхня обкладка конденсатора С. Транзистор VT приклеюється до підкладки і дровими виводами приєднується до відповідних контактних майданчиків.

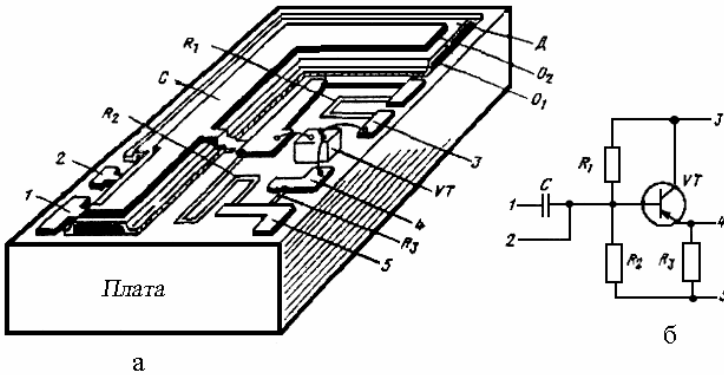


Рис. 150. Плата гібридної мікросхеми:
 а – загальний вигляд: 1–5 контактні майданчики;
 б – принципова схема

Транзистори для гібридних мікросхем виготовляють окремо, тому їх називають не елементами, а компонентами мікросхеми. З метою економії обсягу транзистори застосовують у безкорпусному оформленні, іноді у вигляді складань, їхні параметри мають приблизно ті ж значення, що і звичайних транзисторів. Захист безкорпусних компонентів від впливу зовнішнього середовища здійснюється за допомогою спеціального вологостійкого покриття.

На рис. 150,б показано принципову схему розглянутого пристрою. Вона не є функціонально завершеною, оскільки може бути використана (у підсилювачі з СЕ, СК тощо) лише при підключенні до неї ряду зовнішніх елементів. Така функціональна незавершеність звичайно виникає через труднощі виконання деяких елементів (наприклад, котушок індуктивностей) у вигляді, придатному для монтажу усередині мікросхеми. Іноді мікросхему спеціально роблять функціонально незавершеною, щоб розширити можливості її використання.

Розглянута найпростіша мікросхема має один компонент (транзистор) і чотири пасивних елементи (конденсатор і три резистора). Гібридні ІС, що випускаються промисловістю, у багатьох випадках складніші, кількість їхніх компонентів і елементів може досягати кількох сотень і тисяч.

Активні елементи і компоненти ІС – для спрощення технологічного циклу діоди виготовляють на основі транзисторних структур напівпровідникових ІС. Для швидкодіючих діодів використовують емітерний перехід при замкнених між собою базовому і колекторному виводах; для діодів, що повинні мати велику зворотну пробивну напругу, використовується колекторний перехід, а емітер з'єднується з базою. У другому випадку швидкість перемикання виходить у десятки разів нижча через великий нерівнозначний заряд, що накопичується не тільки в області бази, але й в області колектора, а також через велику ємність переходу.

Польові біполярні транзистори, що застосовуються в інтегральних мікросхемах, виготовляють за технологією напівпровідникових ІС. У гібридних ІС використовують окремі мініатюрні безкорпусні біполярні транзистори, виконані за звичайною технологією, оскільки тонкоплівкова технологія поки не дозволяє одержувати біполярні транзистори задовільної якості.

Технологія одержання польових МДП-транзисторів у напівпровідникових ІС набагато простіша, тому що кількість відповідальних операцій, що впливають на процес виходу придатних мікросхем, значно менша, ніж при виготовленні біполярних транзисторів.

Існує кілька різновидів технологій виготовлення ІС: р-МОП, n-МОП; ТТЛ й ін. Ці технології мають суперечливі якісні показники.

Порівняльні якісні оцінки параметрів найчастіше застосовуваних у великих інтегральних схемах технологій, наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Параметри великих інтегральних схем

Показник	р-МОП	n-МОП	кМОП	ТТЛ
Швидкодія	5	4	2	1
Ступінь інтеграції	2	1	3	4
Потужність, що розсіюється	3	2	1	4
Складність процесу	1	2	4	3

Контрольні запитання

1. Що розуміють під поняттям “мікроелектроніка”?
2. Пояснити елементи електричного кола: резистори, варистори, терморезистори як пасивні елементи кола.
3. Параметри пасивних елементів кола.
4. Різновидності конденсаторів, їх ємність, характеристики, типи.
5. Пояснити будову, роботу трансформаторів, котушок індуктивності як пасивних елементів електричного кола.
6. Що розуміють під “інтегральною мікросхемою”?
7. Назвати активні і пасивні елементи мікросхем.
8. Відмінності між аналоговими і цифровими мікросхемами.
9. Будова гібридних інтегральних мікросхем.
10. Як виготовляють гібридні мікросхеми?
11. Чим відрізняються гібридні мікросхеми від напівпровідникових?
12. Які процеси застосовують при виготовленні напівпровідникових мікросхем?
13. Як виготовляють пасивні і активні елементи в напівпровідникових мікросхемах?
14. Економічна ефективність застосування мікросхем.

2.7. ЕЛЕКТРОННІ ВИПРЯМЛЯЧІ

1. Загальні відомості про засоби електроживлення, випрямлячі: однопівперіодні, двопівперіодні, мостові, трифазні, керовані.
2. Згладжуючі фільтри і стабілізатори постійної напруги.
3. Інвертори.
4. Використання інтегральних схем у джерелах живлення.
5. Хімічні джерела живлення.

1. Загальні відомості про засоби електроживлення. Джерела живлення різних споживачів ділять на первинні і вторинні.

Первинні джерела перетворюють неелектричні види енергії (механічну, хімічну, термо- і фотоелектричну, ядерну тощо) в електричну. З давніх-давен джерелами електроживлення були гальванічні батареї та акумулятори, як первинні джерела живлення, але вони досить дорогі, мають велику масу та малий строк роботи.

Джерела вторинні використовують постійний струм, перетворений із змінного за допомогою випрямлячів, які бувають: одно- і багатозфазні; одно- і двопівперіодні; низько- і високочастотні; керовані і некеровані; лампові і напівпровідникові.

До складу випрямляча може входити: трансформатор напруги, стабілізатор напруги, згладжуючі фільтри, вимірювальні прилади, вимикачі, захисна апаратура тощо.

Однопівперіодні випрямлячі як правило бувають одно- і трифазні. Однофазні однопівперіодні випрямлячі застосовують для живлення споживачів постійного струму при малій потужності (до 1 кВт). Принцип дії їх ґрунтується на односторонній провідності напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів, тиристорів тощо). При цьому пропускається в навантаження тільки один півперіод змінного струму. Розглянемо лише схеми напівпровідникових випрямлячів.

У схемі вторинна обмотка трансформатора напруги, діод і опір навантаження R_H вмикаються послідовно. В додатній півперіод діод відкритий і через навантаження протікає струм i_2 , при напрузі на R_H рівній вихідній напрузі в обмотці трансформатора. В другий півперіод діод закритий зворотною напругою, $i_2=0$.

Таким чином, випрямлений струм і напруга не є синусоїдальними, як на обмотці трансформатора, що видно з наведених графіків.

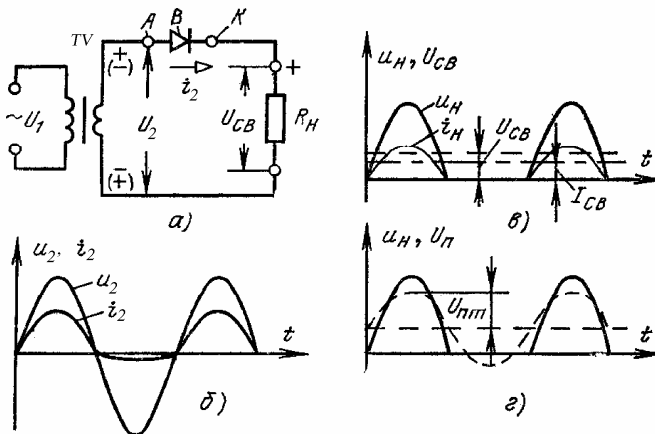


Рис. 151. Схема однопівперіодного однофазного випрямляча (а) і часові діаграми, що пояснюють його роботу (б, в, г)

Струм I_0 і напруга U_0 на навантаженні визначається так:

$$I_0 = \frac{\frac{T}{2}}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{i_2 \partial t}{T} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_2 \partial t = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{2m} \sin \omega t \partial t = \frac{I_{2m}}{\pi} = 0,318 I_{2m};$$

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H = 0,318 U_{2m} = 0,45 U_2, \text{ В.} \quad (272)$$

Отже, напруга U_0 менша від діючого U_2 на вторинній обмотці трансформатора більш ніж у 2 рази.

Зворотна напруга на діоді в непровідний період рівна $U_{зв} = 3,14 U_0$.

Якщо струм через навантаження більший від прямого струму одного діода, то потрібно кілька діодів ввімкнути паралельно, щоб $I_H \geq I_0$, а якщо зворотна напруга на діоді більша від допустимої на діоді, то їх вмикають послідовно.

Подібні схеми випрямлячів прості, але їх к.к.д. низький, велика пульсація струму.

Трифазні випрямлячі застосовують для живлення постійним струмом споживачів великої потужності. Вони рівномірно навантажують трифазну мережу, мають більший к.к.д. та значно менші пульсації напруги.

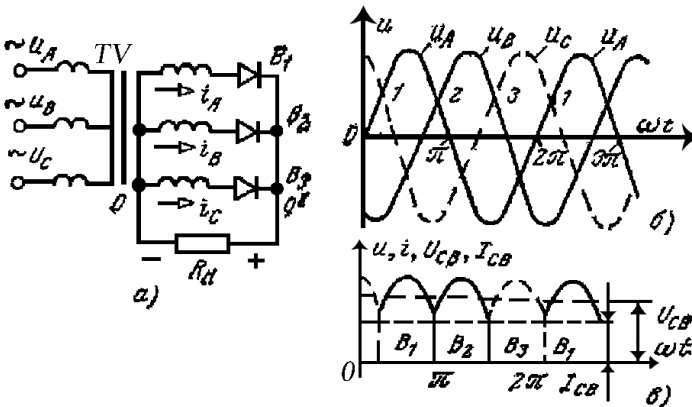


Рис.152. Трифазний однопівперіодний випрямляч (а) і часові діаграми випрямлених напруги і струму (б, в)

На рис.152 наведено схему однопівперіодного трифазного випрямляча з нульовим проводом, де в кожну фазу вихідної обмотки трансформатора вмикають по одному діоду, а їх катоди з'єднують у загальну точку, між якою та нульовою точкою трансформатора вмикають навантаження R_n . Первинна обмотка може вмикатися в трикутник чи зірку, а вторинна – тільки в зірку. При цьому через кожний вентиль (діод) проходить струм протягом однієї третьої частини періоду через вентиль, на аноді якого найбільший додатній потенціал. Наприклад, коли це діод VD1, то діоди VD2 і VD3 закриті; потім VD2 відкривається, а VD1, VD3 – закриті і т.д.

Наведемо основні залежності без виводів:

$$U_0 = 1,17 U_2; \quad I_0 = U_0/R = 0,827 I_{2m}; \quad I_{ср} = I_0/3; \quad (272)$$

$$U_{зв.макс.} = \sqrt{3} U_{2m} \approx 2,1 U_0$$

Коефіцієнт пульсації $k_{\Pi} = 0,25$.

Дані випрямлячі потужніші, оскільки в навантаженні використовують обидва півперіоди змінної напруги.

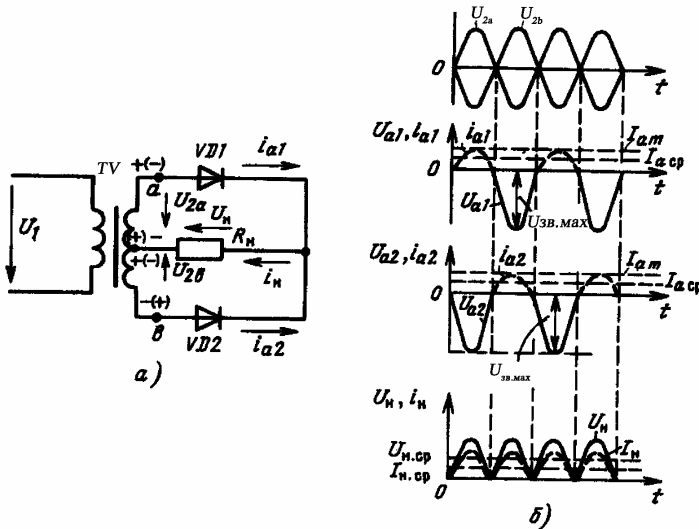


Рис. 153. Схема (а) і часові діаграми напруги і струмів (б) випрямляча з виводом з середньої точки вторинної обмотки трансформатора.

U_{2a} U_{2b} – напруги вторинної обмотки в точці а і в;

U_{a1} , U_{a2} – анодна напруга на діодах VD1 і VD2

Розрізняють два типа випрямлячів: містковий і з виводом з середньої точки вторинної обмотки трансформатора, що наведено на рис.153.

Схема складається з трансформатора, двох діодів VD1 і VD2 та опору R_n . Вона еквівалентна двом однопівперіодним схемам, діоди яких працюють на загальне навантаження R_n , і живляться від двох однакових обмоток трансформатора. При цьому, коли верхній кінець обмотки має додатній потенціал, діод VD1 відкритий, пропускаючи струм у навантаження R_n . Діод VD2 в цей момент закритий. У другий півперіод діод VD2 відкритий додатнім потенціалом нижнього кінця обмотки і струм у тому ж напрямку протікає через навантаження R_n . Випрямлена напруга та струм більше у два рази, ніж у схемі однопівперіодній, тобто:

$$\begin{aligned} U_o &= 0,9U_2; \quad I_o = U_o/R_n \text{ (A)}; \\ U_{зв} &= 3,14 U_o; \quad I_{сеп} = 0,5I_o. \end{aligned} \quad (273)$$

Поширено більше інших схем однофазних випрямлячів, розрахованих на значні струми при малих напругах, можуть працювати з трансформатором напруги і без нього. Таке з'єднання діодів у схемі називають мостом, це з'єднання забезпечує двопівперіодне випрямлення.

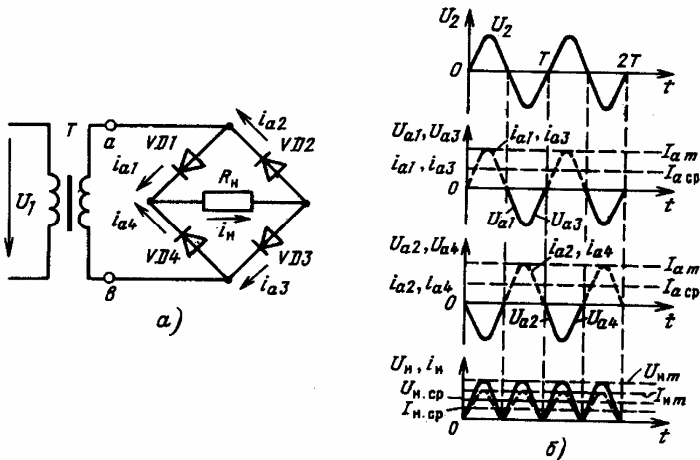


Рис.154. Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) місткового однофазного випрямляча

Принцип роботи схеми в тому, що коли в точці А (+), а в точці В (-) вихідної напруги U_2 , струм протікає по колу: точка А-VD1- R_H -VD3-точка В. Діоди VD1,VD4 у цей півперіод закриті. У другий півперіод діоди VD2,VD4 – відкриті, а VD1-VD3 – закриті і струм проходить по колу: точка В-VD2- R_H -VD4-точка А. В обох випадках струм має однаковий напрям через навантаження R_H .

Трифазні двопівперіодні випрямлячі застосовують при великих потужностях навантаження. У схему входять шість вентилів – по два на кожну фазу. Три діоди, катоди яких з'єднують у загальну точку, називають катодною групою, а решта три, аноди яких з'єднані в загальну точку, складають анодну групу. Між ними вмикають навантаження R_H .

Кожний вентиль пропускає струм протягом 1/3 періоду, тобто одночасно працюють два діоди – по одному із катодної і анодної групи. У катодній групі буде працювати діод, у якого на аноді максимальний (+), а в анодній групі працює діод з максимальним (-) на катоді.

Випрямлена напруга визначається в будь-який момент різницею напруг фаз з найбільшим додатнім і найбільшим від'ємним потенціалом, що є лінійною напругою, тобто навантаження приєднується через діоди до двох фаз вторинної обмотки трансформатора.

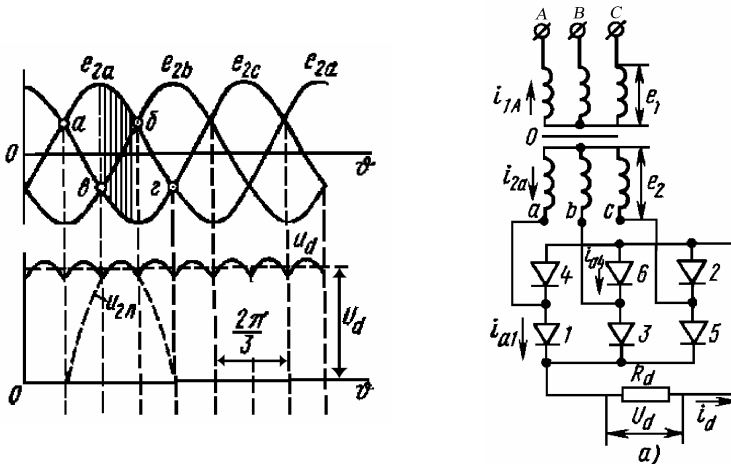


Рис. 155. Трифазна двопівперіодна схема випрямляча (схема Ларіонова) (а) і часові діаграми е.р.с. напруг

Так при відкритому діоді VD1 катодної групи працюють діоди VD2, VD6 з анодної групи з низьким потенціалом катодів у момент визначений точкою В, замість діода VD6 вступає в роботу діод VD2, а VD1 ще працює 1/6 періода, до момента, визначеного точкою Б. Потім вступає в роботу VD3, разом з ним працює VD2 і в точці Г починає працювати VD4. Струми трьох пар діодів утворюють протягом періоду випрямлений струм I_d .

Наведемо деякі співвідношення у схемі випрямляча.

$$U_d = 2,34U_2; I_a = I_d/3 \text{ (A)};$$

$$U_{зв} = 1,05U_d; k = U_1/U_2$$

Керовані випрямлячі застосовують для живлення керованих електроприводів, електромагнітних муфт у пристроях автоматичного керування чи взагалі змінювання струму, а отже потужності навантаження (споживача). У таких випрямлячах використовують керовані напівпровідникові прилади, наприклад, тиристори, що вмикаються послідовно з навантаженням, а їх керуючий електрод ввімкнений у систему керування, що формує керуючі імпульси. Тиристор відкривається додатнім потенціалом на аноді і наявності відкриваючого імпульса на КЕ. Керуючі імпульси виробляє фазорегулятор, які можна зсувати на кут α відносно напруги живлення, тим самим змінювати кут відкриття тиристора в інтервалі 0° до π . При $\alpha=0$ тиристор повністю відкритий, вихідний струм максимальний, оскільки протікає протягом всього півперіоду. По мірі збільшення α струм навантаження зменшується і при $\alpha=\pi$ тиристор закривається.

Просту схему керованого однофазного випрямляча наведено на рис. 156.

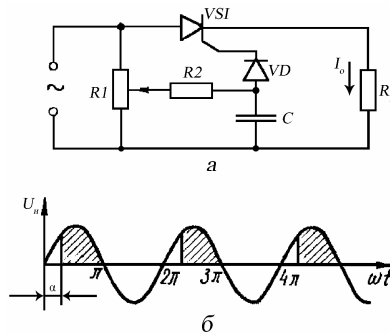


Рис. 156. Схема (а) і часові діаграми вихідної напруги (б) однофазного однопівперіодного керованого випрямляча

Ланка R1, R2, C1 відіграє роль фазорегулятора, змінюючи кут α від 0 до 90°. Практично тиристори регулюють спеціальними імпульсно-фазовими системами керування.

2. Згладжуючі фільтри і стабілізатори постійної напруги.

Згладжуючі фільтри застосовують для зменшення пульсацій випрямленої напруги до рівня, що забезпечує нормальну роботу різної електронної апаратури, і вмикаються між випрямлячем та навантаженням.

Так допустимі значення коефіцієнта пульсації k_n для підсилювачів – до 2% для двотактних; 0,1–0,5% – одноктактних тощо.

Фільтр характеризується коефіцієнтом згладження

$$g = k_n / k_n' \quad (274)$$

де k_n – коефіцієнт пульсації до фільтра;

k_n' – коефіцієнт пульсації після фільтра.

Вимоги до згладжуючих фільтрів: невеликі габарити, маса; високий коефіцієнт згладження; простота, економічність.

Вони діляться на пасивні та активні.

Пасивні фільтри будують на основі пасивних елементів індуктивних котушок L, конденсаторів C, резисторів R, з'єднаних певним чином. Активні фільтри крім пасивних елементів, доповнюються підсилювальними елементами, наприклад, транзисторами. Найпростіші ємнісний та індуктивні фільтри, решта більш складні схеми фільтрів є комбінацією L, C, R фільтрів, наведено на рис. 157.

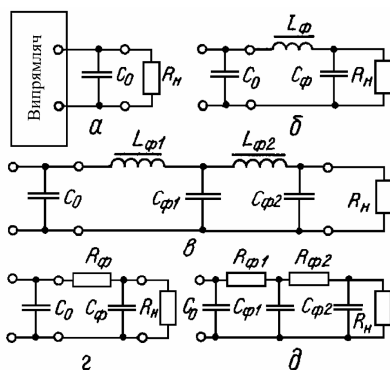


Рис. 157. Схеми згладжуючих фільтрів:
a – простий ємнісний фільтр; *б, в* – фільтри типу LC;
г, д – фільтри типу RC

Як видно зі схем, конденсатори фільтра вмикаються паралельно з навантаженням, а котушки індуктивності L та опори R – послідовно. Ємнісний фільтр застосовують у випрямлячах невеликої потужності. Конденсатор заряджається при відкритому діоді випрямляча і зростає напруги на навантаженні R_n . Коли напруга мережі спадає, конденсатор розряджаючись через R_n , підтримує напругу на ньому. Змінна складова випрямленого струму замикається через конденсатор, а постійна складова надходить у навантаження. При цьому $X_C = 1/\omega C \ll R_n$.

Індуктивний фільтр – це дросель низької частоти, що має великий індуктивний опір $X_L = 2\pi f L_\phi$. Процес згладження пульсацій у тому, що більша частина змінної складової $I_{\text{випр}}$ подавляється дроселем і майже не попадає в навантаження, куди проходить постійна складова $I_{\text{випр}}$. При цьому $X_L = \omega L \gg R_n$.

Застосовуються такі фільтри в потужніших випрямлячах, але вони масивні і в них має місце різке підвищення е.р.с. самоіндукції під час обриву кола. Принцип роботи Г- чи П-подібних фільтрів є комбінацією простих фільтрів.

Стабілізатори напруги – це пристрої, що автоматично з необхідною точністю підтримують напругу на навантаженні в заданих границях. Вмикається на виході джерела живлення.

Існує два типи стабілізаторів напруги: параметричний; компенсаційний.

Параметричний стабілізатор напруги використовує властивість стабілітрона, наприклад, зберігати постійну напругу при зміні (в певних межах) протікаючого через нього струму. Вони прості, надійні, але їх к.к.д. невеликий. У компенсаційних стабілізаторах порівнюється вихідна напруга на навантаженні із заданою (опорною).

На рис. 158. наведено схему параметричного стабілізатора.

У ній балансний опір R_6 і стабілітрон V_{D1} , до якого паралельно вмикається навантаження R_n . При зміні струму I_n або напруги мережі U , напруга U_n змінюється мало, так як U_{CT} змінюється мало при зміні струму через нього від I_{n1} до I_{n2} . Так що із зростанням U мережі повинні зрости напруга U_6 і навантаження.

Завжди $U_n = (U_{вх} R_n) / (R_n + R_6)$, В.

Замість стабілітрона можна застосовувати транзистор, в якому функцію регулюючого елемента виконає перехід – колектор-емітер.

Компенсаційний стабілітрон регулює вихідну напругу в широких межах: складається з джерела еталонної напруги, елемента порівняння, підсилювального та регулюючого елемента.

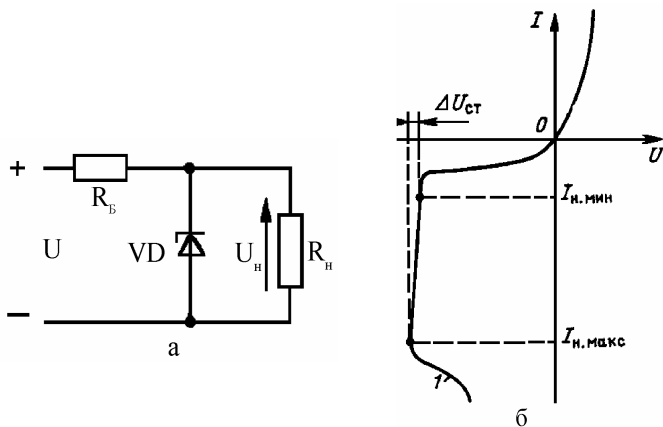


Рис. 158. *Схема параметричного стабілізатора напруги (а) та вольт-амперна характеристика стабілітрона (б)*

У ній опорним елементом, на якому утворюється еталонна напруга, є стабілітрон VD, а елементом порівняння та регулюючим служить транзистор VT. Як видно зі схеми $U_{\text{вих}} = U_{\text{об}} + U_{\text{ст}}$ (в нормальному режимі), режим роботи транзистора, як регулюючого органа, вибирають таким, щоб він був відкритий не повністю, напругою $U_{\text{об}}$ при цьому $U_{\text{вих}} \approx U_{\text{ст}}$.

Якщо $U_{\text{вих}}$ зменшується, то напруга на стабілітроні майже не змінюється, а зменшення напруги на R_H аналогічно збільшенню додатного потенціалу на емітері по відношенню до бази.

Транзистор відкривається, його опір зменшується, напруга $U_{\text{ек}}$ зменшиться, а $U_{\text{вих}}$ збільшиться відповідно до початкового, заданого.

Однокаскадну схему компенсаційного елемента наведено на рис. 159.

Подібним чином при збільшенні $U_{\text{вих}}$ транзистор закривається, відповідно, напруга $U_{\text{ек}}$ збільшується, що веде до зниження $U_{\text{вих}}$, до заданого.

Схему послідовного компенсаційного транзисторного стабілізатора напруги з підсилювачем у колі зворотного зв'язку наведено на рис. 160.

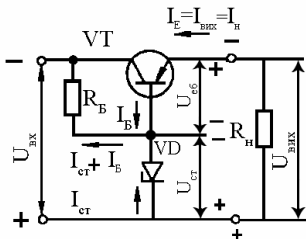


Рис. 159. Схема однокаскадного транзисторного стабілізатора напруги

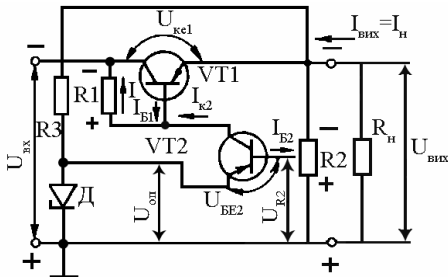


Рис. 160. Схема компенсаційного стабілізатора напруги з підсилюючим каскадом

В схемі транзистор VT1 – орган регулюючий, а VT2 – елементом порівняння та підсилення.

Напруги поділяються так: $U_{вх} = U_{вих} + U_{к1}$; $U_{он} = U_{бэ2} + U_{R2}$.

Якщо $U_{вих}$ зростає, то зросте U_{R2} , тому що $U_{вих} = U_{R2} + U_{вих\ част}$, а U_{R2} прикладено в прямому напрямку до емітерного переходу VT2. Внаслідок цього збільшується I_e , I_k транзистора VT2, а напруга U_{R1} , зростаючи, і буде на своїй полярності зворотною для емітерного переходу VT1.

Тому VT1 прикриється, його опір зросте, напруга $U_{к1}$ зросте, що зменшить $U_{вих}$ до заданого. Відповідно схема працює при зменшенні $U_{вих}$ – VT2 прикривається, VT1 відкривається, $U_{вих}$ – зростає.

Параметри стабілізаторів напруги

1. Коефіцієнт стабілізації $K = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вих} / U_{вих}}$;
2. Вихідний опір $R_{вих} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta I_{вих}}$ при $U_{вх} = const$;
3. Коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{U_{вих} I_{вих}}{U_{вх} I_{вх}}$;
4. Дрейф вихідної напруги.

3. Інвертори – це пристрої перетворення постійного струму у змінний заданої величини і частоти.

Основним елементом його є безконтактний ключ на транзисторах, тиристорах, працюючих за принципом відкритий–закритий. Їх

застосовують для живлення телевізорів, осцилографів, радіопередачів потужністю кілька сот ват, а самі вони живляться, наприклад, від акумуляторів, сонячних батарей тощо.

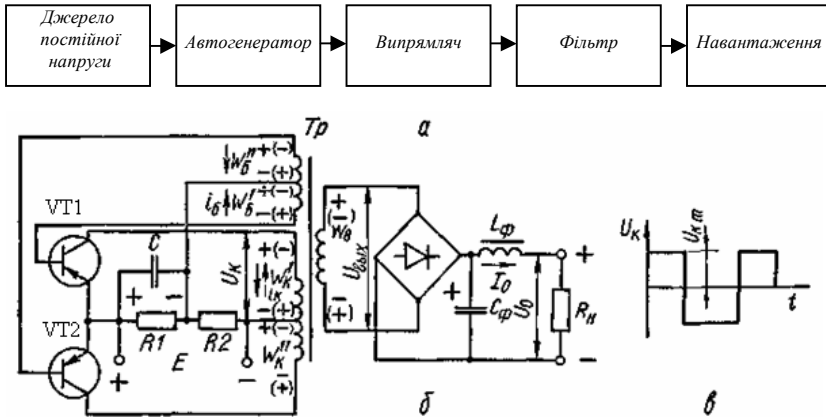


Рис. 161. Схема інвертора на транзисторах

Транзистори в схемі ввімкнені із спільним емітером. Самозбудження інвертора досягають введенням додатного зворотного зв'язку між вихідним колом колектора і входним базовим за допомогою обмоток W_{03}' і W_{03}'' трансформатора Tr . Це призводить до почергового відкривання та закривання транзисторів $VT1$, $VT2$, наводячи в обмотці трансформатора змінний струм. Резистори R_1 і R_2 запускають інвертор (відкривають транзистори) під час вмикання живлення, тобто підтримують на базах невисокий від'ємний потенціал. Нехай у певний час $VT1$ відкритий, струм його проходить по колу: $+E$ -обм. $W_{к}'$ - $VT1$ - $-E$, створюючи е.р.с. на обмотці $W_{к}'$ з полярністю, як на схемі ($+$ вгорі $W_{к}'$).

При цьому е.р.с. базової обмотки W_6' створює на базі $VT1$ від'ємний відкриваючий потенціал, а на обмотці W_6'' е.р.с. створює на базі $VT2$ додатний закриваючий потенціал, тобто $VT1$ – відкритий, а $VT2$ – закритий.

Це буде до того часу, доки магнітний потік осердя не досягне насичення (максимального значення), коли швидкість його зміни буде близькою до нуля, струм в обмотках різко зменшиться, що призведе до появи в обмотках е.р.с. протилежної полярності (знаки показані в

дужках). Тепер базова обмотка W_6'' відкриє VT2 і потече струм по колу +E-обм. W_6'' -VT2- -E в протилежному напрямку.

Ці процеси протікають лавиноподібно і швидко, транзистор VT2 буде повністю відкритим, а VT1 – закритим. Коливання первинної обмотки трансформатора індукують у вторинній зміну напруги певної величини та частоти.

Застосовують потужніші інвертори, що перетворюють постійний струм у змінний, одно- чи трифазний з допомогою тиристорів.

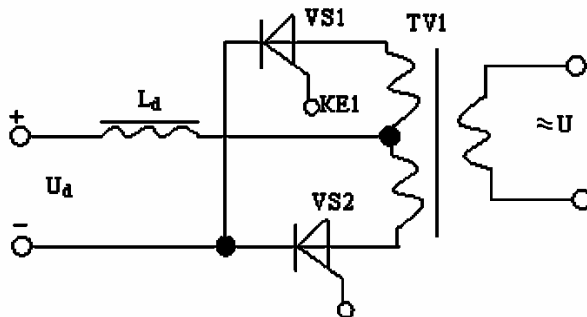


Рис.162. Схема інвертора на тиристорах

У схемі інвертора (рис. 162) однофазного з середньою точкою перемикання тиристорів з допомогою керуючих електродів відбувається напругою мережі, тому ці інвертори звуть веденими мережею або залежними (від неї). Дросель L_d згладжує різницю між напругою U_d та е.р.с. самоіндукції інвертора.

Тиристри VS1 і VS2 працюють по черзі, якщо VS1 відкритий і пропускає струм в половині первинної обмотки, то VS2 – закритий. Через півперіод VS2 відкривається, пропускаючи струм у другу половину обмотки в протилежному напрямі, то VS1 – закривається. У вторинній обмотці таким чином індукується змінна напруга.

Умова нормальної роботи інвертора

$$\beta = \gamma + \delta \leq \beta_{\text{крит.}} \quad (275)$$

де β – кут випередження вмикання тиристорів;

γ – кут комутації;

$\delta = \text{tg} \times 360 \times f_{\text{мережі}}$. (tg – час переключення тиристора, що приводиться в його паспорті).

4. Використання інтегральних схем у джерелах живлення.
 Необхідність у стабілізаторах для живлення різної апаратури, виконаних на ІМС, привело до розробки спеціальних інтегральних схем стабілізаторів напруги, що працюють разом з дискретними елементами (опори, конденсатори, стабілітрони тощо).

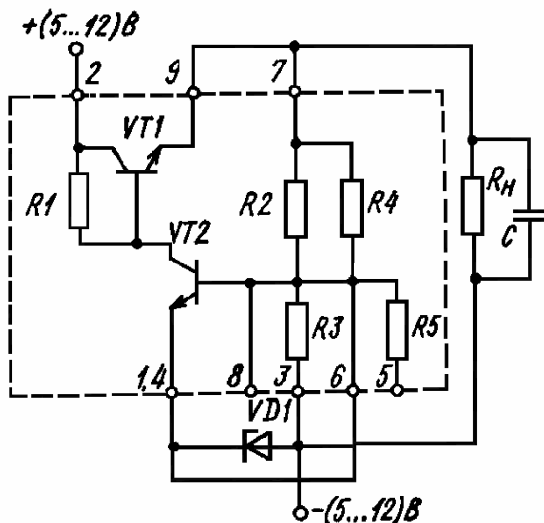


Рис. 163. Інтегральний стабілізатор на ІМС типу К2ПП241

На рис. 163. наведено схему інтегрального стабілізатора типу К2ПП241 для живлення малопотужних навантажень струмом до 4mA при вхідній напрузі 5,4...12 В і вихідній 3,3...3,9 В.

У стабілізаторі опорним елементом є стабілітрон VD1, що підключається до мікросхеми, підсилювач на транзисторі VT2 і регулюючий транзистор VT1. Вхідні зажими мікросхеми – 2 і 3, а вихідні – 7 (9) і 3.

Стабілізатори напруги серії К142ЕН5 можуть вмикатися за схемою.

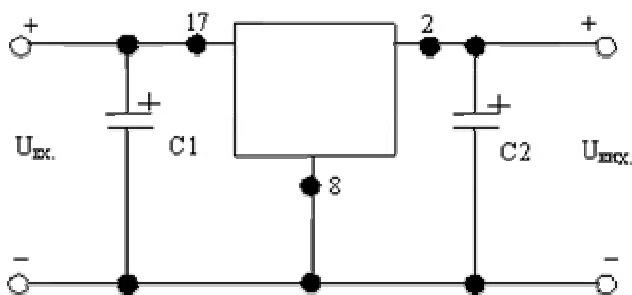


Рис. 164. Схема вмикання стабілізатора

$C2=C1 \approx 10$ мкФ – для полярних алюмінієвих конденсаторів.

При використанні мікросхем K142EH11 $U_{\text{вх}}$ знаходиться в межах 5...45 В, а $U_{\text{вих}}$ –1,2...36 В, температура робоча – 20...+100°C.

5. Хімічні джерела живлення використовують як автономні джерела для живлення різної електронної апаратури, а також для резервних джерел постійного струму, що перетворюють хімічну енергію в електричну у підводних судах, електрокарах, автотранспорті: бувають первинні, в якому мають місце незворотні процеси перетворення хімічної енергії в електричну, і вторинні, які після розряду знову заряджають постійним струмом, для їх подальшої роботи.

Первинні джерела – це гальванічні елементи, сухі. Додатнім електродом в них (марганцево-цинкового елемента) служить двоокис марганцю, а від’ємним – металічний цинк. Електролітом служить розчин солі (хлористого амонію) або лугу (ідкого калію). Для більш стійкої роботи елемента в нього вводять невелику кількість муки, крохмалу тощо. Е.р.с. елемента 1,5–1,8 В, внутрішній опір від 0,1–10 Ом.

Елементи виготовляють двох видів: стаканчикові (пальчикові) та галетні, котрі мають значно більшу ємність, ніж пальчикові. В елементах ртутно-цинкових активна маса додатного електрода складається з ртуті і графіту, а від’ємний – з порошку цинку і ртуті. Їх е.р.с. рівна 1,36 – 1,364 В. При необхідності елементи з’єднують послідовно, в окремих випадках паралельно.

Акумулятори (вторинні елементи). За видом електроліту діляться на кислотні і лужні. Лужні акумулятори порівняно з кислотними міцніші, не бояться перевантажень та коротких замикань,

підвищення температури середовища тощо. Існує багато типів лужних акумуляторів, але для всіх їх застосовують один і той же електроліт – водний розчин лугу. Залежно від складу активної маси від’ємних пластин (електродів) лужні акумулятори ділять на нікель-цинкові, залізонікелеві, нікель-кадмієві, срібно-цинкові тощо. На рис.165 показано будову лужного акумулятора. Як видно з рисунка, в сталевому посуді розміщені пластини додатні, від’ємні, ізольовані між собою ебонітовими паличками. Електролітом служить їдкий калій, і в роботі акумулятора участі не бере, а тільки проводить струм. Номінальна напруга одного акумулятора – 1,25 В.

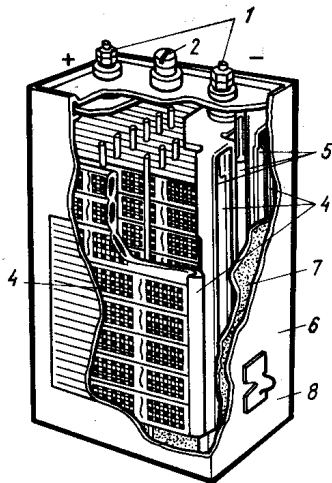


Рис. 165. Будова лужного акумулятора:

- 1 – контактні виводи; 2 – заливні отвори; 3 – сепаратор;
 4 – позитивні пластини; 5 – ізолюючі ебонітові палички;
 6 – корпус; 7 – ізолююча прокладка; 8 – цапфа

Кислотні акумулятори використовують для живлення електронної апаратури в умовах зниженої температури та короткочасних перевантаженнях. Вони складаються з додатних пластин (чистий свинець) та від’ємних пластин (сульфат свинцю), ізольовані між собою сепаратором і опущені в розчин кислоти (наприклад, сірчаної). Для роботи акумулятор заряджають постійним струмом, електроліт розкладається на іони – на від’ємному електроді виділяється водень, а

на додатному – кисень. У результаті додатні пластини покриваються шаром перекису свинцю, а від’ємні залишаються чисто свинцевими.

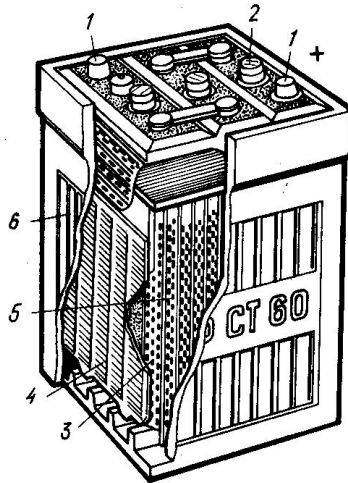
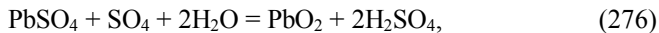


Рис. 166. Будова кислотного акумулятора:
 1 – контактні виводи; 2 – заливні отвори; 3 – панцир;
 4 – ізолюючі прокладки; 5 – сепаратор; 6 – корпус

Під час розряду струм проходить у зворотному напрямку, тому хімічні процеси також протікають зворотно: на додатні пластині виділяється водень, а на від’ємні – кисень. Через певний час пластини стають однаковими за хімічним складом, е.р.с. зменшується з 2,05 В до 1,8 В, після чого потрібно його знову підзарядити.

Таким чином під час зарядки анод акумулятора відновлюється згідно з рівнянням:



а катод – $\text{PbSO}_4 + 2\text{H} = \text{Pb} + \text{H}_2\text{SO}_4$.

Під час розряду акумулятора струм проходить від анода PbO_2 до катода Pb через навантаження, а всередині акумулятора іони SO_4^- і H^+ рухаються в напрямку, протилежному зарядці.

Деякі типи сухих елементів:

“Квант” – 316 $U_p=1,52$ В;

“Салют” – 373 $U_p=1,55$ В;

“САТУРН” 465 $U_p=1,5$ В;

“Крона ВЦ” $U_p=9\text{ В}$ $R_{\text{н}}=900\text{ Ом}$ – батарея з двох елементів.
Акумулятори свинцеві СН – 1, СН – 20; ємність відповідно 40 і 800 ампергодин.
НЖ–100 – лужний акумулятор ємністю 100 А·год.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під засобами електроживлення?
2. Чим відрізняються первинні і вторинні джерела живлення?
3. Пояснити роботу однофазного однопівперіодного випрямляча.
4. Пояснити роботу, схему вмикання трифазного півперіодного випрямляча.
5. Пояснити роботу, схему вмикання однофазного двопівперіодного випрямляча (з середньою точкою вторинної обмотки трансформатора).
6. Пояснити роботу, схему вмикання мостової схеми випрямляча.
7. Пояснити роботу, схему вмикання трифазної двопівперіодної схеми.
8. Як підібрати діоди до однофазних і трифазних схем випрямлячів?
9. Замалювати схему керованого випрямляча.
10. Які принципи роботи основних схем згладжуючих фільтрів під час застосування R, L, C ланок?
11. Пояснити роботу, схему вмикання параметричних стабілізаторів напруги.
12. Пояснити роботу, схему вмикання компенсаційних стабілізаторів напруги.
13. Робота, застосування первинних і вторинних хімічних джерел живлення.

2.8. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ І ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИКИ

1. Види і призначення автоматичних систем.
2. Автоматичні системи з розімкнутим колом дії: система регулювання, система пошуку.
3. Загальні властивості елементів автоматичних схем.
4. Функціональні елементи: сприймальний (вимірювальний), керуючий, виконавчий, керований об'єкт.

1. Види і призначення автоматичних систем. У сільськогосподарському виробництві є багато процесів, об'єктів, які потрібно автоматизувати.

У тваринництві – процеси водопостачання, кормоприготування, кормороздачі, вентиляції, обігріву приміщення тощо; у рослинництві – очищення зерна, сушіння, зберігання зерна, обігрів теплиць, парників та ін.

Для здійснення автоматичного керування застосовують автоматичний керуючий пристрій (автоматичний регулятор), який замінює дії людини, пов'язані з керуванням об'єктом (водокачкою, електродвигуном, теплицею тощо). Сукупність об'єкта керування і автоматичного регулятора становить автоматичну систему керування.

За принципом дії автоматичні системи поділяються на програмні, стабілізуючі та слідкуючі.

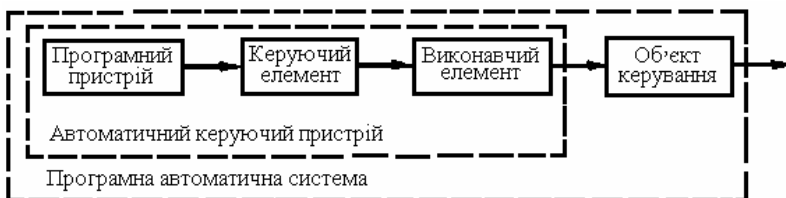


Рис. 167. Функціональна схема програмної автоматичної системи

Програмна автоматична система автоматично забезпечує зміну керованої величини за даним законом (програмою), яка складається на основі вимог технологічного процесу. Це можуть бути системи програмні керування станками, освітленням в пташниках тощо.

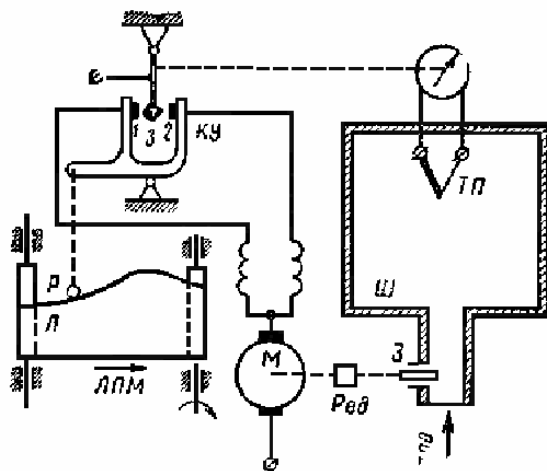


Рис. 168. Схема АСР програмного регулювання температури

Стабілізуюча автоматична система забезпечує підтримання керованої величини на заданому рівні із заданою точністю.

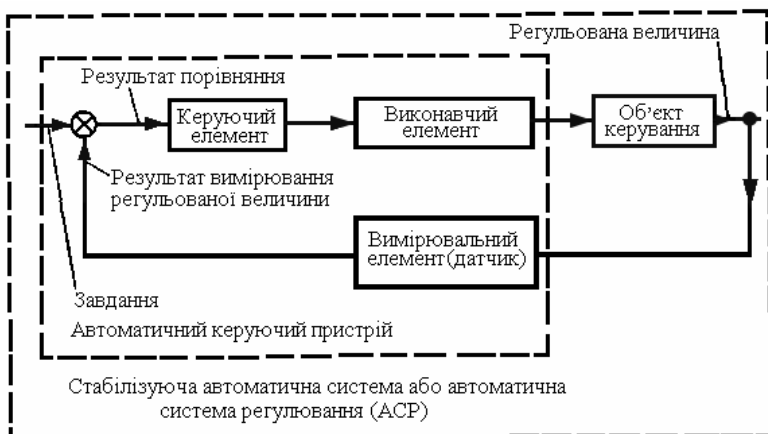


Рис.169. Функціональна схема стабілізуючої автоматичної системи

Розгляньте системи автоматизації, подані на рис.170.

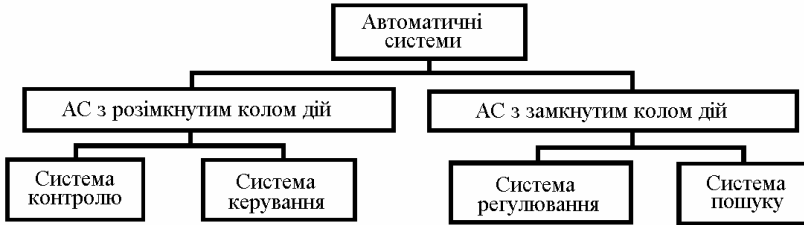


Рис. 170. Класифікація автоматичних систем за характером керування

Такі системи часто називають автоматичними системами регулювання (АСР), а керовану величину – регульованою величиною.

Ці системи замкнені: в них сигнал подається не тільки від регулятора на об'єкт керування, а й зворотні дії (контрольні) – від керованого об'єкта на вхід автоматичного регулятора. Оскільки потрібне значення керованої величини в системі стабілізації незмінне, то різниця між ним і дійсним значенням її не повинна перевищувати допустимого значення.

Приклади стабілізуючих систем: автоматична система регулювання рівня води у водокачці; автоматична система підтримання заданої температури в парниках, овочесховищах; системи регулювання частоти обертання двигунів тощо.

При цьому регулювання може бути статичним, коли значення керованої величини при різних значеннях навантаження приймає різні значення, тобто статичні регулятори підтримують задану величину з певним відхиленням, яке називають статичною похибкою, та астатичне регулювання, коли регулятор підтримує контрольовану керовану величину постійною.

Слідкуюча автоматична система використовується для зміни керованої величини залежно від значення (або відповідно до значення) невідомої заздалегідь змінної величини на вході автоматичної системи.

До слідкуючих систем належать автоматичні системи водіння тракторів, сільськогосподарських машин тощо.

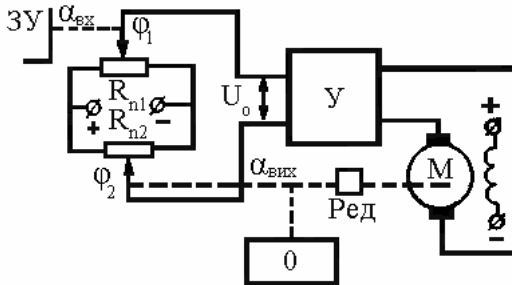


Рис.171. Схема слідкуючої автоматичної системи для керування розташуванням об'єкта

2. Автоматичні системи з розімкнутим колом дії: система регулювання, система пошуку. Автоматична система з розімкненим колом дій – це система, в якій дії мають односторонній напрям: або від керованого об'єкта до керуючого елемента (контроль), або від керуючого елемента до керованого об'єкта (керування). Прикладом системи контролю може бути система контролю температури теплиці, система вимірювання струму, частоти, напруги тощо. Приклад системи керування – система дистанційного і програмного вмикання і вимикання електроприводів, водонагрівачів, освітлення приміщень тощо.

Автоматична система із замкненим колом дії – це система, в якій вхідними діями для керуючого елемента є дії зовнішні та контрольні.

Автоматична система регулювання (АРС) – система з замкненим колом дій, в якій керуючі дії формуються в результаті порівняння дійсного і заданого значення керованої величини. Це системи регулювання температури, вологості в інкубаторах, теплицях тощо.

Автоматична система пошуку – це система з замкненим колом дій, в якій підсумкова керуюча дія виробляється за допомогою пробних керуючих дій та аналізу результатів цих дій.

Це системи, що автоматично підтримують (максимальне чи мінімальне) значення регульованої величини (витрати палива, енергії). Система працює в режимі постійного пошуку, і на вхід її спеціальним пристроєм безперервно подаються збурюючі дії; залежно від того, як при цьому змінюється регульована величина, відповідно змінюється керуюча дія, забезпечуючи екстремальне значення керованої величини (наприклад, підтримання оптимального режиму роботи сушарки, що

опалюється складною сумішшю). Завдання системи пошуку полягає в тому, щоб відшукати таку витрату повітря, при якій температура носія буде найбільшою при змінах роботи сушарки.

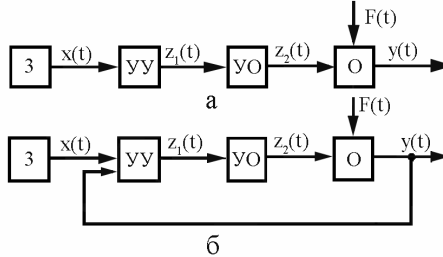


Рис. 172. Схема керування по розімкненому (а) і замкненому (б) циклах

3. Загальні властивості елементів автоматичних систем.

Всяка автоматична система складається з окремих елементів (функціональних блоків), що виконують певні функції і пов'язані між собою. Це частина системи, в якій проходять якісні або кількісні зміни фізичної величини, передача перетвореної дії від попереднього до наступного елемента.

Основні елементи систем автоматики: сприймальний (вимірювальний) або датчик; елементи порівняння; підсилювачі; виконавчі механізми; задавачі (елементи наладки); коректуючі елементи; регулювальний орган; елементи захисту.

Сприймальні елементи (датчики) вимірюють дійсне значення керованої величини, перетворюють її в однозначну відповідну величину, зручну для порівняння з заданою величиною (завданням регулятора).

Елементи порівняння в більшості випадків вимірюють різницю сигналів між заданим значенням керованої величини і її дійсним значенням у цей час.

То ж задавачі (задаючий елемент) формують задаючу дію, яка визначає необхідне значення керованої (контрольованої) величини, тобто це є завданням регулятора системи автоматики.

Підсилювач служить для підсилення різниці сигналів (між завданням і дійсним значенням контрольованої величини) до значення, достатнього для приведення в роботу виконавчого елемента. Підсилювач працює за рахунок джерела енергії і може бути електричним (електронні, релейні, електромагнітні, напівпровідникові тощо),

гідралічні, пневматичні з високим коефіцієнтом підсилення потужності.

Виконавчі елементи (механізми) безпосередньо діють на керований об'єкт (водокачку, сушарку тощо) з метою зміни параметрів керованої величини до заданого рівня.

Коректуючі елементи – може бути місцевий внутрішній зв'язок для покращення регулювальних властивостей системи автоматики в цілому або її окремих частин.

Регулювальний орган – це частина виконавчого елемента. Він може регулювати подачу маси, енергії до об'єкта керування за допомогою зміни пропускної здатності (продуктивності об'єкта). Застосовують вентиля, клапани, заслінки тощо.

Елементи захисту (теплові реле, автомати, запобіжники тощо) виконують захисні функції при недопустимих режимах роботи системи.

Елементи автоматики характеризують параметри: статична і динамічна характеристики, передаточний коефіцієнт, похибка, чутливість.

Статична характеристика елемента автоматики – залежність між вихідною “у” та вхідною “х” величинами в усталеному режимі, тобто $y = f(x)$. Ці характеристики бувають лінійні і нелінійні.

Динамічна характеристика – це також залежність $y = f(x)$, але в перехідному режимі (неусталеному), коли у і х змінюються в часі.

Передаючий коефіцієнт – відношення у до х:

в усталеному режимі $K_c = \frac{y}{x}$ – статичний коефіцієнт;

в неусталеному режимі $K_d = \frac{\partial y}{\partial x} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$ – динамічний коефіцієнт.

Похибка – це різниця між дійсним і номінальним значенням вихідної контрольованої величини.

Для зображення автоматичних систем використовують принципи, функціональні, структурні схеми.

Функціональна схема – це сукупність функціональних елементів, пов'язаних між собою певним чином, позначаються прямокутниками, всередині яких приводять назву елемента відповідно до його функції, а зв'язок між елементами показують стрілками (рис. 173).

-
- невисока вартість, зручність в експлуатації;
 - висока надійність.

Розрізняють датчики електричних і неелектричних величин, генераторні і параметричні, датчики безперервної дії та дискретної тощо. Є датчики температури, рівня, швидкості, тиску, вологості тощо.

Керуючі елементи автоматичних систем аналізують стан контрольованих параметрів на підставі інформації, одержаної від датчиків і визначають необхідність, характер, ступінь дії автоматичного пристрою на керований об'єкт.

До керуючих елементів належать реле, контактори, логічні елементи, розподільники, випрямлячі, стабілізатори, корегуючі елементи тощо.

Найчастіше керуючим елементом систем автоматики є реле електричні різної конструкції, що замикає або розмикає відповідні кола.

Їх класифікують за такими ознаками: параметр, від якого вони спрацьовують, – напруга, струм, потужність тощо; вид фізичних величин, на які вони реагують, – електричні, механічні, магнітні, теплові тощо; призначення – реле керування, захисту, блокування і т.п. Оскільки з названих типів реле більше поширені електричні, що реагують на різні електричні величини, то їх вивчено більш детально.

Такі реле мають три основні функціональні елементи: сприймаючий, проміжний, виконавчий. Сприймаючий елемент безпосередньо реагує на зовнішній контрольований параметр і перетворює його у фізичну величину. Виконується на електромагнітному, електродинамічному, магнітоелектричному та інших принципах.

Проміжний елемент (у контактних реле – це пружина), одержавши від сприймаючого елемента перетворений сигнал, зрівнює його із заданим і при відхиленні від нього формує команду на спрацювання реле, а отже виконавчого елемента.

Виконавчий елемент (у контактних реле – це контактна система), одержавши команду від проміжного, діє на кероване коло, змінюючи його параметри. Розрізняють реле прямої дії, коли виконавчий елемент безпосередньо діє на контрольоване коло і реле непрямої дії – виконавчий елемент діє на контрольоване коло, через інші апарати.

Основною характеристикою реле є статична (характеристика керування). Це залежність вихідної величини y від вхідної x . Для більшості реле має форму петлі гістерезиса. На характеристиках

видно, як при зміні вхідної величини x ($x_1, x_2, -x_1, -x_2$), змінюється вихідна величина y ($y_{max}, -y_{max}$).

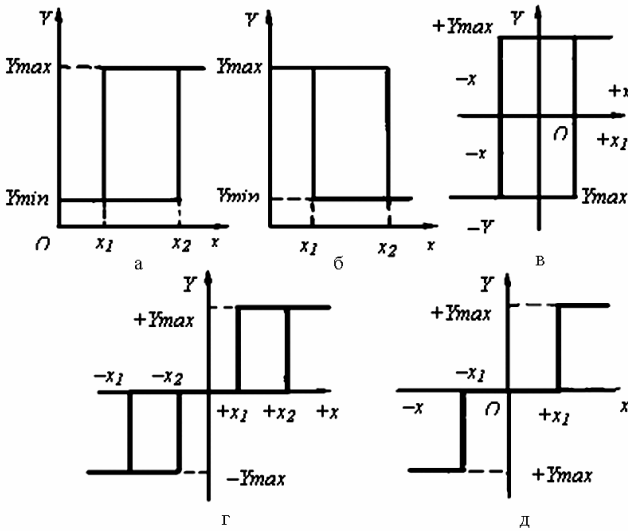


Рис. 174. Види статичних характеристик релейних елементів:
а, б – двопозиційного нейтрального реле; в – двопозиційного реле з двома стійкими станами; г, д – трипозиційне реле

Основні параметри, що характеризують роботу реле:

- параметр спрацювання $X_{спрац}$ – значення вхідної величини, при якому реле спрацює і характеризує чутливість реле;
- параметр відпускання $X_{відп}$ – значення вхідної величини, коли реле повертається у вихідне положення.

Відношення цих параметрів називають коефіцієнтом

повернення $K_{\Pi} = \frac{X_{відп.}}{X_{спр.}} < 1$.

Робочий параметр – найбільше значення $X_{вх}$, коли реле тривалий час ввімкнене і працює нормально.

Розрізняють коефіцієнти запасу:

а) при спрацюванні $K_{з.спрац.} = \frac{X_{роб.}}{X_{спрац.}} > 1$;

б) при відпусканні $K_{з.відп.} = \frac{X_{відп.}}{X_{роб.}} < 1$.

$X_{роб}$ – робочий параметр.

Час спрацювання реле $t_{спр}$ – час від моменту подачі на вхід $X_{вх} \geq X_{спрац}$ до замикання (розмикання) керованого кола.

Тривалість відпускання $t_{відп}$ – проміжок часу від подачі $X_{відп}$ до розмикання (замикання) кола. Ці параметри застосовують більше для реле нейтральних, що реагують лише на величину вхідного сигналу. Реле, що реагують на полярність вхідного сигналу називають поляризованими, де поряд з електромагнітом додатково встановлюють постійний магніт (рис. 175).

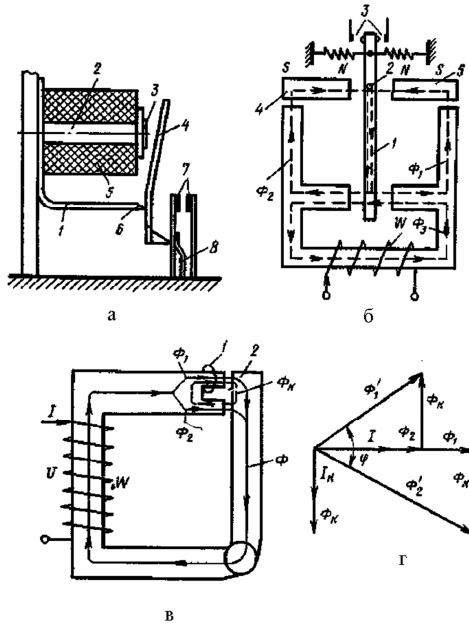


Рис. 175. Схеми конструкції реле:

а – клапанного типу: 1 – скоба, 2 – сердечник, 3 – електромагніт, 4 – яркі, 5 – котушка, 6 – призма, 7 – контакти, 8 – пружина; *б* – поляризоване реле:

1 – яркі, 2 – вісь, 3 – контакти, 4, 5 – магніти; *в* – змінного струму:

1 – мідний короткозамкнений виток, 2 – рухомий сердечник;

г – діаграма магнітних потоків

Останнім часом поширені реле з магнітокеруючими контактами герконами (герметизованими контактами) вакуумними, газонаповненими, контакти яких замикаються (розмикаються) під дією магнітного поля (рис.176).

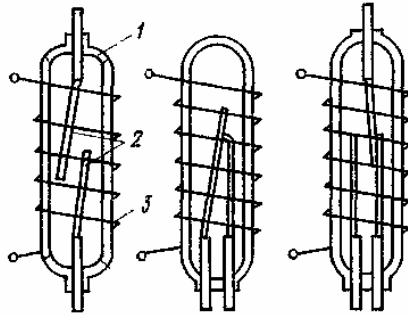


Рис. 176. Реле з магнітокеруючими контактами (геркони):
 1 – скляна ампула; 2 – електроди (контакти); 3 – обмотка

У системах автоматики застосовують також реле часу, що забезпечує затримку дії вихідного сигналу після подачі $X_{\text{вх}}$ за рахунок паралельного вмикання до обмотки електромагнітного реле резистора R , конденсатора C або напівпровідникового діода V (рис. 177). Також застосовують електромагнітну, пневматичну, механічну затримку спрацювання реле.

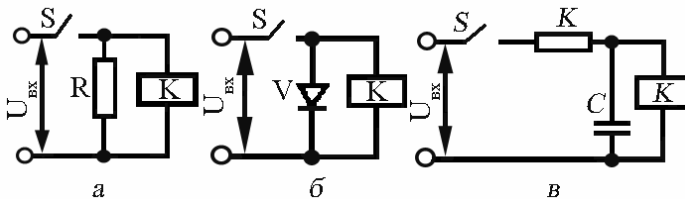


Рис. 177. Схеми регулювання затримки часу (а, б, в)

Різні затримки часу одержують за рахунок моторних реле часу з приводом від двигуна синхронного через електромагнітну муфту. Спеціальні командні електропневматичні прилади КЕП служать для керування великою кількістю електричних, пневматичних кіл. Раніше в автоматичці, телемеханіці застосовувалися крокові шукачі (розподільники), коли при подачі імпульса на обмотку реле щітки шукача переходили з контакта на контакт, крок за кроком. Джерелом імпульсів на обмотку шукача є контакти реле або пульс-пари. Крокові шукачі можуть бути прямої ШП-17 чи зворотної дії (ШП-25, ШП-50).

Стабілізатори – пристрій для автоматичного підтримання постійними струму, напруги тощо. Частіше інших застосовують

стабілізатори напруги параметричні, що працюють не по замкненому циклу, використовуючи активні або реактивні нелінійні опори (терморезистори, стабілітрони, баретери). Вони прості, дешеві, але точність стабілізації їх невисока. Більш високу точність мають компенсаційні стабілізатори, що працюють за принципом відхилення. У них вихідна величина (наприклад, напруга) безперервно зрівнюється з заданою еталонною напругою, різниця цих напруг діє на нелінійний виконавчий елемент стабілізатора, в результаті компенсується зміна вихідної напруги, з точністю 1–2% при зміні $U_{\text{вих}}$ на 10–15%, при інертності 0,1–1с.

Розвиток автоматики, телемеханіки характеризується підвищеним обсягом, швидкістю переробки інформації при високій чутливості, точності дії технічних пристроїв, їх надійності. Ці вимоги не виконують електромеханічні пристрої, як об'ємні, дорогі, з низькою надійністю (відкази в середньому 10^{-5} /год). Практично надійність їх забезпечена на кілька десятків годин роботи, тому виникла необхідність зміни контактних електромеханічних пристроїв на безконтактні логічні серії “Логіка Т”, “Логіка І” на базі мікросхем К511, герконових реле, оптронах, тиристорах, симісторах. На вхід логічних елементів подають електричні сигнали від датчиків, у унормованих за рівнями струму, напруги, а до виходу підключаються електромеханічні виконавчі елементи.

Так функціональні елементи служать для приймання, перетворення сигналів від зовнішніх джерел інформації до вигляду, придатному для передачі на логічні елементи. Логічні елементи (наприклад І-301) реалізують затримку в часі формування імпульсів різної тривалості, частоти, а елементи І-405, І-402 підсилювальні сигнали, що надходять на вхід виконавчого пристрою.

Виконавчий елемент системи автоматичного регулювання і дистанційного керування – це пристрій, що забезпечує переміщення регулюючого органа згідно з поступаючими сигналами, що надходять від керуючого органа.

При цьому переміщення робочих органів може бути обертовим, поступальним тощо. Отже, виконавчий елемент з допомогою робочого органу безпосередньо діє на об'єкт керування (мал. 178).

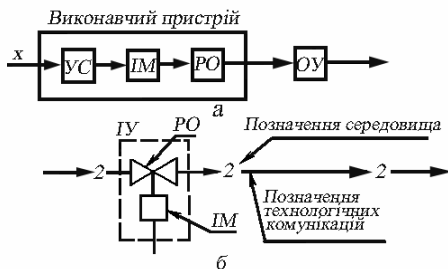


Рис. 178. Виконавчі пристрої:

а – структурна схема; б – позначення елементів виконавчого пристрою на функціональній технологічній схемі

У загальному випадку виконавчий елемент складається з: виконавчого двигуна – джерел силової дії на регулюючий орган; передаточного або перетворюючого пристрою (розміщується між виконавчим двигуном і регулюючим органом, що призначений для одержання певної швидкості, характеру переміщення регульованого органа); кінцевих вимикачів, що обмежують переміщення робочого органа, його фіксації в певних положеннях; елементів керування (пускачі, клапани, золотники тощо), захисту (запобіжних і приливних клапанів); сигналізації, контролю тощо.

Основні параметри виконавчого механізму (ВМ): номінальне значення крутного моменту на вихідному валу або зусилля на вихідному штоку; максимальне значення обертового моменту чи зусилля; зона чутливості (нечутливості); постійна часу; час одного оберту вала ВМ або його штока; величина інерційного вибігу вихідного вала ВМ.

Переміщення органа вихідного виконавчого механізму після його відключення називають вибігом, який чутливо впливає на якість процесу регулювання. Його намагаються зменшити налагоджуванням систем, якщо можна, зменшують вільний хід вихідного органа ВМ.

Основними показниками ВМ – їх статичні та динамічні характеристики. Статичні властивості ВМ характеризують взаємозв'язок між його вхідним і вихідним координатами в усталеному режимі.

Керовані об'єкти системи автоматики – це різні машини, установки, потокові технологічні лінії, цехи, в яких керовані (регульовані) величини за допомогою автоматичних керуючих пристроїв підтримуються на заданому рівні або змінюються за цим законом (алгоритмом).

До об'єктів керування належать, наприклад, різні нагрівальні установки, електропривід машин та механізмів, тваринницькі приміщення, овочесховища з регульованим мікрокліматом, водокачки, зерносушарки тощо.

У схемах автоматизації керований об'єкт є однією з ланок і його статичні та динамічні характеристики – це характеристики відповідних типових динамічних ланок.

Статична характеристика – це залежність керованої величини від величини керуючої дії в усталеному режимі при незмінному зовнішньому збуренні.

Динамічна характеристика – це залежність в часі керованих величин під впливом вхідних (керуючих) дій у неусталеному режимі.

Властивість керованого об'єкта накопичувати енергію, речовину тощо називають акумулюючою здатністю і характеризується ємністю об'єкта. За акумулюючою здатністю керовані об'єкти бувають одно- та багатоемнісні, а його властивість прагнути повернутися в стан рівноваги без стороннього втручання після зникнення збурення, називають самоврівноваженням.

Взагалі об'єкти керування можуть бути із самоврівноваженням і без самоврівноваження.

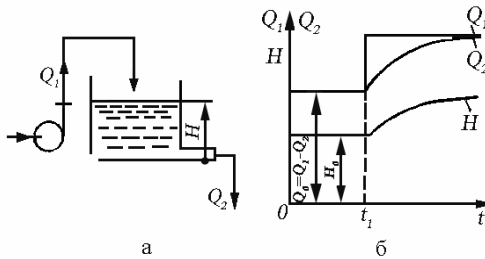


Рис. 179. Об'єкт керування з самовирівнюванням:
а – схема; б – динамічні характеристики

На рис. 179. показано динамічну характеристику об'єкта з самовирівнюванням: якщо в момент часу t_1 різко збільшити подачу рідини Q_1 , то зросте рівень її H , а значить збільшиться витрата рідини Q_2 . Перехідний режим буде до того часу, коли $Q_2 \approx Q_1$ і наступить нова рівновага. Такий об'єкт здатний без стороннього втручання повертатися до усталеного режиму.

На рис. 180 наведено динамічну характеристику об'єкта без самовирівнювання. У схемі при $Q_2 = \text{const}$ збільшуючи Q_1 в часі t_2 , H

теоретично збільшується безмежно, а значить самовирівнювання відсутнє.

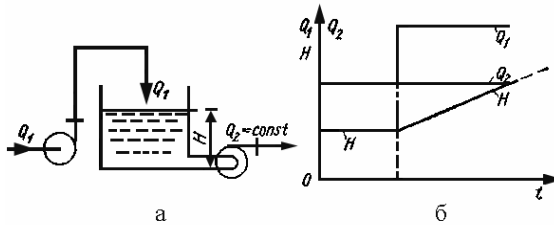


Рис. 180. Об'єкт керування без самовирівнювання:
а – схема; б – динамічні характеристики

Якщо відхилення регульованої величини не виходить за межі допустимого значення, відпадає потреба в регуляторі, тобто в об'єкті здійснюється саморегулювання.

Інерційні властивості об'єкта характеризуються сталими часу перехідного процесу та часу запізнення (транспортне, ємнісне). Співвідношення між сталою часу T_0 і часом запізнення τ_0 обумовлюють вибір певного типу регулятора (релейного, імпульсного чи регулятора неперервної дії).

Контрольні запитання

1. Назвати автоматичні системи, що застосовують у сільському господарстві.
2. Як розділяють автоматичні системи за принципом дії та їх коротка характеристика?
3. Дати визначення автоматичної системи з розімкненим колом дії (навести приклади).
4. Дати визначення автоматичної системи із замкненим колом дії (навести приклади).
5. Які основні елементи системи автоматики та яка їхня роль?
6. Навести приклади сприймальних, керуючих виконавчих елементів.
7. Приклади об'єктів керування систем автоматики та їх коротка характеристика.

2.9. ДАТЧИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

1. Загальні відомості про датчики.
2. Генераторні і параметричні перетворювачі, резистивні, індуктивні, ємнісні датчики, фотоелектричні датчики, датчики кутової швидкості і положення, датчики температури.
3. Датчики забезпечення роботи систем двигунів внутрішнього згорання і систем автоматизації роботи сільськогосподарських машин і агрегатів.

1. Загальні відомості про датчики. Контроль за режимом роботи різних машин, агрегатів, протікання технологічних процесів потребує пристроїв, що вимірюють значення величин, характеризуючи ці процеси. У схемах автоматики ці пристрої називають датчиками. Датчик – це пристрій, що вимірює параметри технологічного процесу, режими роботи машин, агрегатів і перетворює виміряну фізичну величину в сигнал, зручний для подальшого використання в елементах автоматичної системи.

Будь-яка величина незалежно від її фізичної природи може бути перетворена в електричну величину (наприклад, механічний рух в індуктивність або напругу, температура в е.р.с. тощо). Такі датчики відносяться до електричних.

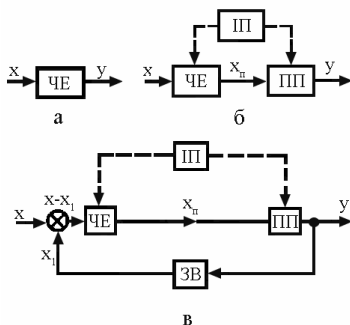


Рис. 181. Функціональні схеми датчиків:

- а – з безпосереднім перетворенням; б – з проміжним перетворенням;
в – з проміжним перетворенням і зворотним зв'язком*

При перетворенні неелектричної величини в неелектричну іншої природи (наприклад, механічне переміщення в тиск повітря, рідини

тощо) застосовують неелектричні датчики (механічні, пневматичні, гідравлічні та ін.).

Всі електричні датчики за принципом дії ділять на параметричні, що перетворюють неелектричні величини в електричні (опір R , ємність C , індуктивність L) і генераторні, що перетворюють неелектричні величини в е.р.с. Параметричні датчики працюють від стороннього джерела енергії.

Функціональні схеми датчиків наведено на рис. 181.

2. Генераторні і параметричні перетворювачі, резистивні, індуктивні, ємнісні датчики, фотоелектричні датчики, датчики кутової швидкості і положення, датчики температури. У генераторних датчиках у виконавчому елементі проходить безпосереднє перетворення контрольованої величини “ X ” у вихідну “ Y ” за рахунок енергії вхідної величини “ X ”. До параметричних датчиків належать контактні, реостатні, тензодатчики, термодатчики, ємнісні, індуктивні, фотоелектричні тощо.

Таблиця 5

Класифікація датчиків

Вимірювальні величини	Тип датчиків													
	неелектричні			електричні										
	механічні	гідравлічні (пневматичні)	потенціометричні	тензометричні	індуктивні	терморезисторні	ємнісні	фоторезисторні	електронні	індукційні	п'єзоелектричні	термоелектричні	датчики Холла	фотоелектричні (вентильні)
Переміщення	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Рівень	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Швидкість	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+
Прискорення	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
Сила	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-
Тиск	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Момент	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
Вологість	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-
Температура	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+
Витрата рідини	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-
Вібрація	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-

Генераторні датчики – це термоелектричні (термопари), індукційні, п'єзоелектричні, вентильні фотоелементи. Розрізняють класи точності датчиків: 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

За характером зміни вихідного сигналу в часі розрізняють датчики безперервної дії, що виробляють сигнал безперервної та дискретної дії, у яких значення вихідного сигналу у певні проміжки часу рівне нулю.

Основні характеристики датчиків – статична характеристика, чутливість, динамічна характеристика, вихідна потужність, опір. Статична характеристика – це залежність вихідної величини “Y” від вхідної “X” $y=f(x)$.

Чутливість датчика є залежність

$K_c = \frac{y}{x}$ – коли чутливість постійна (залежність $y=f(x)$ прямолінійна); (277)

$K_c = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ – для датчиків з нелінійною характеристикою. (278)

В автотракторному електрообладнанні та електрообладнанні сільськогосподарських машин застосовують прилади та засоби сигналізації:

- тахометр – для визначення частоти обертання колінчастого вала двигуна, барабана комбайна чи інших робочих органів;
- спідометр – для визначення швидкості руху автомобіля, агрегату та пройденого шляху;
- манометр – визначає тиск масла у двигуні, гідросистемі, палива в системах живлення, повітря в системах гальмування, різних виконавчих приладах;
- покажчики температури – визначає температуру рідини, масла, впускних газів, повітря в кабіні тощо;
- покажчики рівня – визначає рівень рідини, палива в баках, радіаторах;
- сигналізатори (світлові, звукові) – контролюють режим роботи двигуна агрегату (граничні значення тиску, температури, повороту, стану робочих органів технологічних машин).

У системах автоматики для вимірювання зусиль, моментів сил, лінійних і кругових переміщень тощо широко застосовують датчики електричного опору, тобто резистивні.

Перетворення переміщення в напругу чи струм здійснюється згідно з певними функціональними залежностями при лінійних переміщеннях $y=f(x)$ і при кутових – $U=f(y)$.

Конструктивно резистивний (потенціометричний) вимірюючий пристрій (рис. 182). складається з каркаса (прямого чи кругового), обмотки з константану, манганіну, нікеліну і повзунка. Замість обмотки може бути плівка з радію, нанесеного на скло.

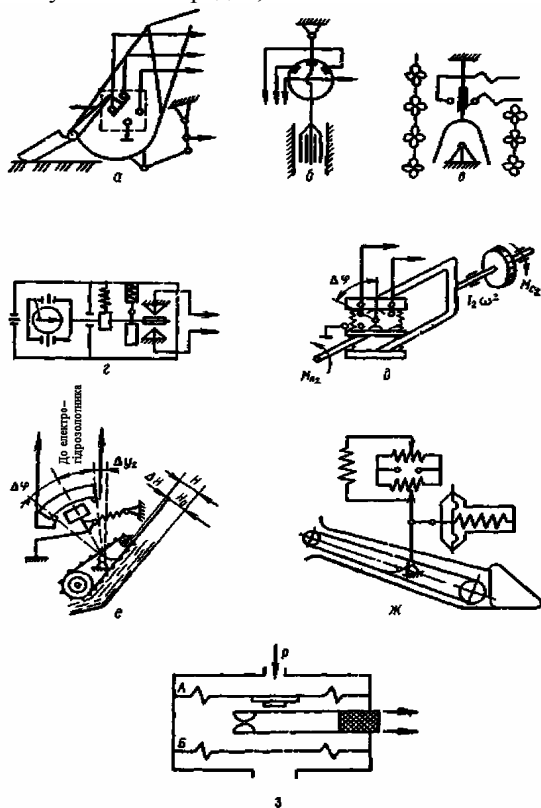


Рис. 182. Механічні датчики з електроконтактами для контролю:
а – висоти зрізу жаткою; б, в – напрямку руху агрегату; г – нахилу машини на схилах; д, е, ж – завантаження молотарки комбайну; з – вимірювання тиску повітря

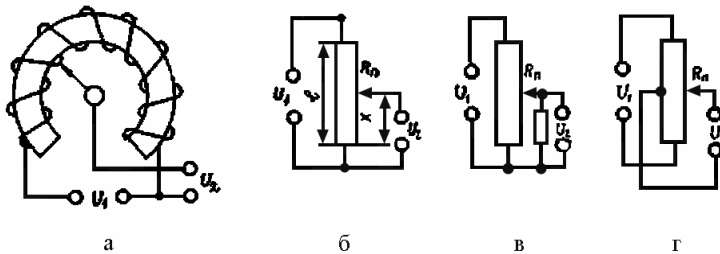


Рис. 183. Реостатні (потенціометричні) датчики:
 а – круговий; б – прямий; в – схема вмикання датчика;
 г – схема вмикання датчика з середнім виводом

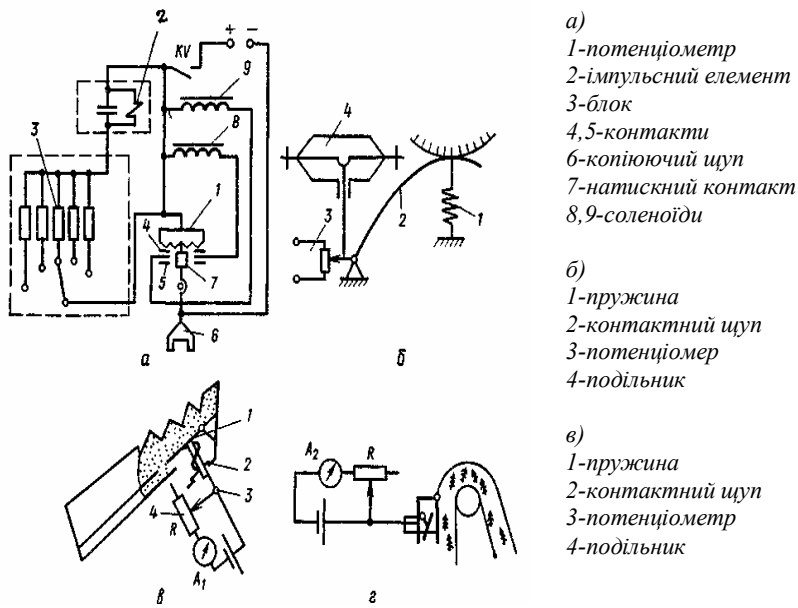


Рис. 184. Застосування потенціометричних датчиків:
 а – для керування тракторним агрегатом; б – для автоводіння
 комбайна; в, г – для визначення втрат зерна комбайном

Як видно з рисунка 183, вихідна напруга U_2 для схем відповідно, починаючи зліва:

а) $U_2 = IR_y = \frac{U_l}{R_n} R_y = U \frac{y}{y_0} = ky$ – пропорційна до кута y ;

б) $U_2 = IR_x = \frac{U_l}{R_n} R_x = U l \frac{x}{l} = k_l x$ – пропорційна до переміщення x ;

в) $U_2 = f(x)$ тільки при $R_m \rightarrow \infty$ має лінійний характер;

г) $U_2 = \frac{U_l x}{2 l} = \frac{l}{2} k_l x$.

Типи датчиків резистивних: ПЛІ, ПД, ПК, МУ.

Для вимірювання сил, моментів, тиску застосовують тензометричні датчики (тензопари), принцип дії яких базується на явищі пьезоефекту – зміна активного опору провідників, напівпровідників під дією механічних зусиль.

Основна їх характеристика – коефіцієнт тензочутливості K :

$$K = \frac{\Delta R}{R} \text{ при зміні деформації } \frac{\Delta l}{l}$$

$k \approx 2$ – для проволочних тензорезисторів.

$k \approx 100$ – для напівпровідникових.

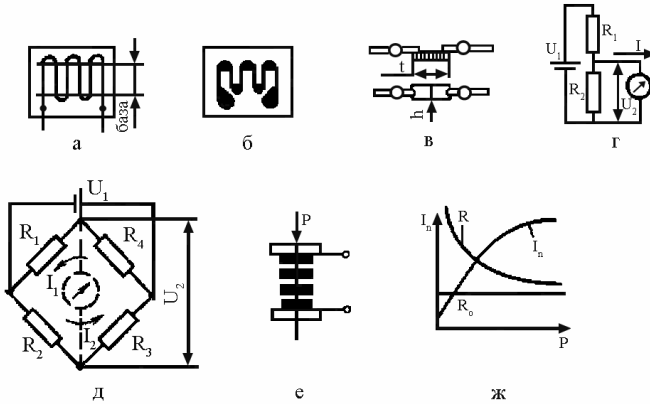


Рис. 185. Тензометричні датчики:

а – дротяний; б – з фольги; в – напівпровідниковий; г – відповідно потенціометрична і мостова схеми вимірювання тензодатчиків; е – вугільний; ж – статична характеристика вугільного перетворювача

На рис. 184 наведено схеми потенціометричних датчиків в системах автоматики тракторів, комбайнів. Так, у системі автоматики трактора копіюючий щуп 6 нажимним контактом 7 з'єднується з одним з контактів 4 або 5, що замикають коло керуючих соленоїдів 8 або 9. Одночасно замикається потенціометр 1 і через відповідний опір блока 3 дає сигнал в коло імпульсного елемента 2.

Після зарядки конденсатора спрацьовує реле, яке своїм контактом KV розмикає коло соленоїда, регулюючи тривалість та амплітуду керуючого сигналу.

В системі автоводіння комбайном застосовують механічний контактний щуп 2 у вигляді флюгеркопіра, закріпленого зліва польового подільника і притиснутий до бровки пружиною 1. Будь-яке відхилення копіра потенціометром 3 перетворюється в електричну напругу (184,б).

Для визначення втрат зерна комбайном до одного із соломотрясів на його кінці укріплюють пластину 1, що опирається так що при відхиленні пластини переміщується повзунок реостата і прилад вимірвальний показує втрати зерна (184, в,г).

Аналогічно вимірюють втрати зерна в результаті недомолоту.

Індуктивні датчики (електромагнітні перетворювачі) застосовують для вимірювання тиску, витрати різних рідин, газів, лінійних, кутових переміщень, обертів тощо.

Прості за конструкцією, надійні, велика потужність на виході, відсутність рухомих контактів, живлення від мережі змінного струму частотою 50 Гц зумовлює їх широке застосування у схемах автоматики.

Принцип дії їх ґрунтується на зміні індуктивного опору X_L магнітної системи при переміщенні феромагнітного осердя чи зміні зазору в ньому під дією вхідної величини (переміщення, деформації, рівня, тиску і т.п.).

За видом перетворення електромагнітні пристрої поділяють на індуктивні, трансформаторні, магнітопружні, індукційні.

Індуктивні датчики перетворюють зміну регульованої величини в зміну індуктивного опору обмотки; працюють на змінному струмі; складається з осердя, котушки індуктивності та якоря (рис.186).

Під час переміщення якоря під дією регульованої величини змінюється відповідно зазір δ , а значить індуктивність L , повний опір Z_L , струм I .

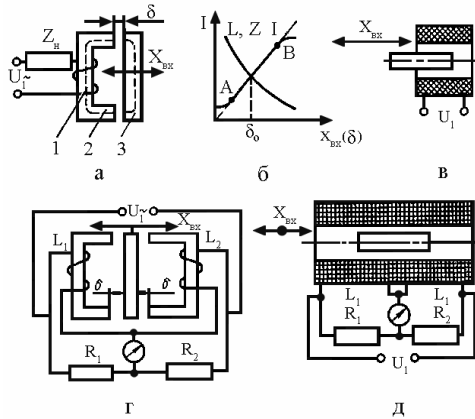


Рис. 186. Індуктивні датчики:

a – якорний; *в* – соленоїдний; *б* – статична характеристика датчика;
г, д – відповідно реверсивні схеми вмикання якорного і соленоїдного датчика

Наведемо деякі залежності :

$$I = \frac{U}{Z_L} = \frac{U}{\sqrt{R_K^2 + X_L^2}} \text{ (А)}, \quad X_L = 2\pi Lf \text{ (Ом)}, \quad X_L \gg R \quad L \approx \frac{w^2 s \mu_2}{\delta} \text{ (Гн)}.$$

s –переріз магнітопроводу, м².

$$\text{Чутливість датчика } S = \frac{\Delta z / z}{\Delta \delta / \delta}.$$

Статична характеристика індуктивного датчика $I=f(\delta)$ в точках А і Б має величини, тому вибираючи початковий зазор δ_0 потрібно, щоб робоча точка розміщувалась на середині прямолінійної ділянки її. Практично лінійну залежність $I=f(\delta)$ можна одержати в реверсивних (диференціальних) схемах датчиків, що складаються з двох звичайних, нереверсивних. (див. рис.185).

Трансформаторні датчики – це різновидність індуктивних датчиків, принцип дії яких полягає в зміні взаємної індуктивності обмоток, при переміщенні їх між собою або при переміщенні якоря датчика. Трансформаторні датчики є генераторними і діляться на дві групи залежно від способу вимірювання взаємної індуктивності: датчики з переміщуючим якорем та поворотним (рис.187).

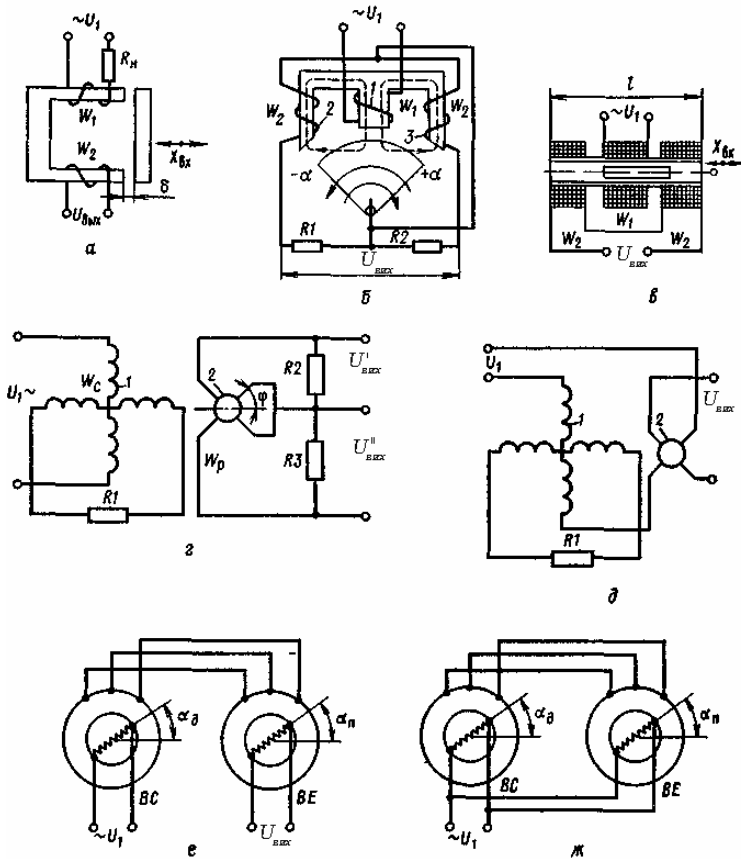


Рис. 187. Трансформаторні датчики:

а, в – з рухомим якорем; б – з поворотним якорем; г, д – синусно-косинусний і лінійний обертовий трансформатори; е, ж – схеми вмикання датчиків трансформаторна та індикаторна

У цих датчиках вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ не залежить від величини U_1 джерела живлення. У вторинній обмотці W_2 наводиться е.р.с.: $E_2 = \omega W_2 \Phi = f(\delta)$ (В) $\omega = 2\pi f$.

Для датчиків тристержневих з поворотним якорем, де первинна обмотка живиться від мережі змінного струму, а вторинні з'єднані

послідовно і зустрічно при $\Phi_1 = \Phi_2$ $U_{\text{вих}} = 0$ при повороті якоря $\Phi_1 \neq \Phi_2$ і вихідна напруга рівна $U_{\text{вих}} = k\alpha$ (В) α – кут повороту якоря.

Для трансформаторних датчиків соленоїдного типу вихідна напруга рівна:

$$U_{\text{вих}} = k U_1 w_2 / w_1 X_{\text{вх}} \quad (\text{В}) \quad X_{\text{вх}} = (0, 1 \dots 0, 2) l. \quad (279)$$

Трансформаторні датчики під час вимірювання кутових переміщень часто виконуються у вигляді електричних машин (обертові трансформатори) та сельсинів, у яких первинна обмотка розміщується на статорі, а вторинна – на роторі.

Контактні і безконтактні датчики-сельсини діляться на сельсини-датчики і сельсини-приймачі.

Магнітопружні датчики виготовляються у вигляді осердів різної форми з розміщеним на ній однієї або кількох обмоток. Принцип роботи – зміна магнітної проникності феромагнітного осердя під дією механічних сил, температури (магнітопружний ефект).

Отже, під дією навантаження одночасно змінюється лінійні розміри осердя і магнітна проникність його. Чутливість датчика:

$$k = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l} = \frac{E}{\delta} \frac{\Delta\mu}{\mu}, \quad (280)$$

де E – модуль пружності осердя.

Для залізо-нікельового осердя $K \approx 200 \dots 300$.

Схеми датчиків наведено на рис.188.

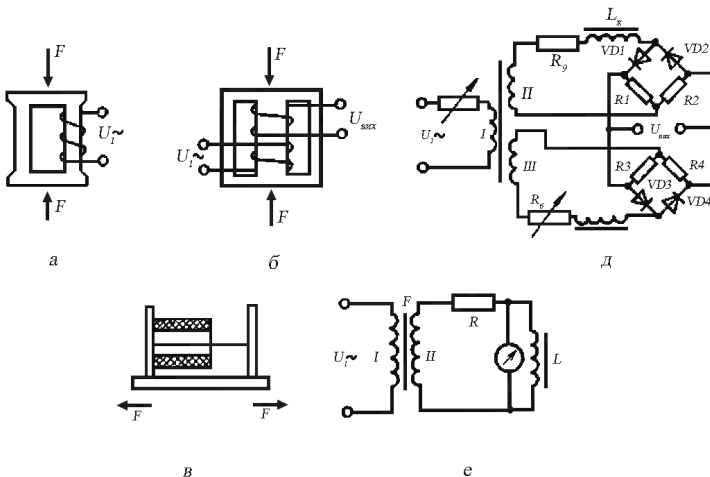


Рис. 188. Магнітопружні датчики:

а, б – з одною і двома обмотками; в – з перемалюєвим проводом;

г, д – послідовна та диференціальна схеми вмикання датчиків

Недоліки цих датчиків: значні похибки, наявність залишкової деформації тощо.

Індукційні датчики – це датчики генераторні. Принцип дії їх ґрунтується на явищі електромагнітної індукції – на веденні е.р.с. у контурі при зміні магнітного потоку Φ в ньому, тобто

$$E_{\Phi} = -w_2 d\Phi/dt \text{ (В)}. \quad (281)$$

Індукційні датчики бувають двох типів: з котушкою, що лінійно X або під кутом Y може переміщуватись відносно постійного магніту ($E = k\Phi dx/dt$), і з феромагнітним осердям, що переміщується відносно нерухомого магніту і котушки (рис. 189).

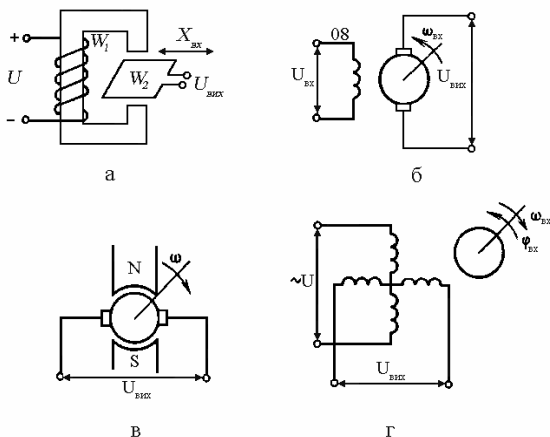


Рис. 189. Індукційні датчики:

- а – з рухомою котушкою; б, в – тахогенератори постійного струму з збудженням від обмотки і постійних магнітів; г – тахогенератор змінного струму*

Більшість індукційних датчиків мають лінійну статичну характеристику $E = f(x, y)$, похибку в межах 0,5–1,5%.

Точнішими індукційними датчиками є тахогенератори постійного струму – мініатюрні генератори постійного струму незалежного збудження від постійних магнітів або обмоток збудження. Вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ тахогенераторів і оберти прямо пропорційні на холостому ході.

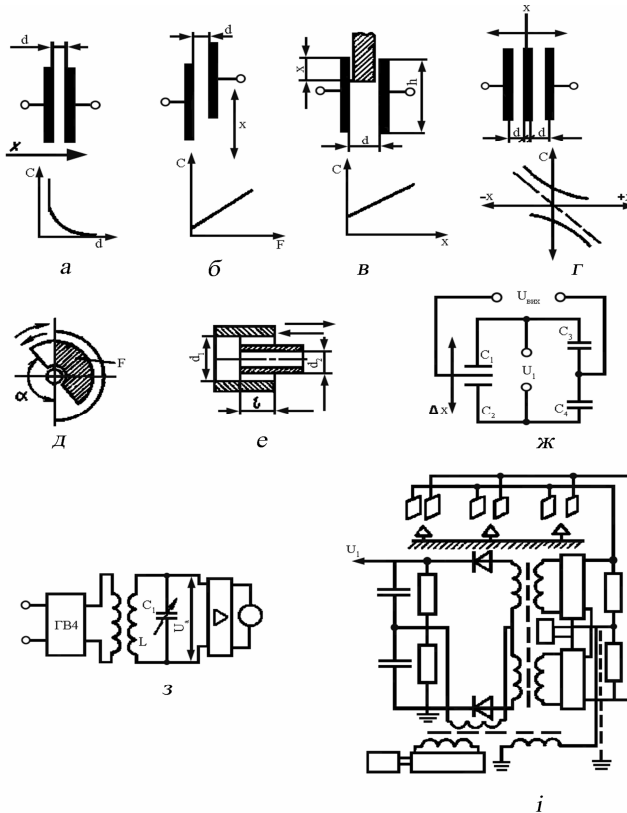


Рис.190. Ємнісні датчики:

*а, г – із змінним зазором між обкладками; б, д, е – із змінною площею пластин;
в – із змінною проникністю; ж, з – мостова і резонансна схеми вмикання датчиків; і – перетворювач для знаходження розташування рослин*

Ємнісні датчики-конденсатори, віддаль між обкладками яких і площа змінюється під дією вхідної (регульованої) величини.

Ємність плоского конденсатора і його опір рівні

$$C = \epsilon_0 \frac{\epsilon S}{d}, \Phi; X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \text{ Ом.}$$

Ємнісні датчики із змінним d служать для вимірювання лінійних переміщень (рис.190) з точністю 0,1–0,01 мкм, а датчики із змінною площею S вимірюють лінійні та кутові переміщення. Для вимірювання

рівня, вологості, температури тощо застосовують датчики із змінною діелектричною проникністю.

Ємнісні датчики-перетворювачі можуть застосовуватися при автоматичному водінні комбайнів під час міжрядної обробки сільськогосподарської культури. При цьому з двох сторін ряду даної культури встановлюють комплект пластин, що утворюють ємності відповідно C_1 і C_2 . Якщо, наприклад, сільськогосподарський агрегат розміщений правильно відносно рядків, то $C_1=C_2$, – вихід з датчиків відсутній. При відхиленні агрегату від нормального положення $C_1 \neq C_2$, датчиком виробляється електричний сигнал і автоматичний регулятор повертає агрегат у міжряддя (вліво чи вправо), поки C_1 не буде рівна C_2 , $\Delta C \approx 0$.

Під час автоматизації різних виробничих процесів застосовують фотодатчики, що перетворюють світловий потік в електричний сигнал. Випускаються датчики – перетворювачі: вакуумні, газонаповнені, та напівпровідникові (рис.191).

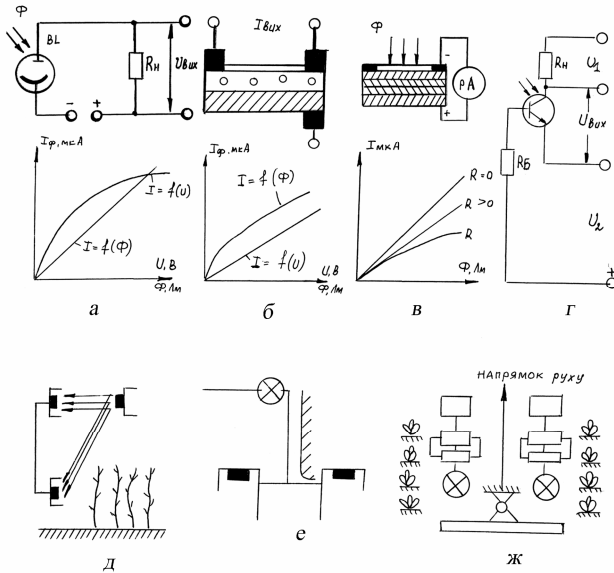


Рис. 191. Фотоелектричні датчики:

*а, б, в – із зовнішнім, внутрішнім, вентильним фотоелектом;
 г – схема вмикання фототранзистора; д, е – фотоелектричні
 перетворювачі для визначення напрямку руху жатки;
 ж – пристрій системи автоводіння агрегату*

Основні їх характеристики: світлова $I_{\Phi}=f(\Phi)$; спектральна $S_{\lambda}=f(\lambda)$ – залежність чутливості від довжини хвилі та вольт-амперна $I_{\Phi}=f(U)$.

Газонаповнені фотоелементи відрізняються від вакуумних тим, що крім анода і фотокатода в колбі є інертний газ. Їх фотострум змінюється пропорційно. У напівпровідникових фотоелементах під дією світлового потоку виникають вільні електрони в шарі напівпровідника, різко змінюючи їх опір.

Поширені типи фоторезисторів напівпровідникових: сірчато-кадмієві ФС-К, сірчато-свинцеві ФС-А, сірчато-вісмутіві ФС-Б тощо.

При автоматизації водіння комбайнів вздовж обробки нескорошеного хліба джерела інфрачервоного випромінювання знаходяться по обидві сторони бровки. Електричні сигнали на виході приймача пропорційні до товщини шару рослин між випромінювачем і приймачем. Це пристрої для вимірювання рівня рідин, речовин тощо. Розрізняють мембранні, електродні, поплавкові тощо.

Мембранні датчики застосовують для вимірювання верхнього, нижнього рівня сипких матеріалів у бункерах. При цьому спрацьовують з певним зусиллям мікроперемикачі, коли рівень сипкого матеріалу відповідає заданому (рис.192).

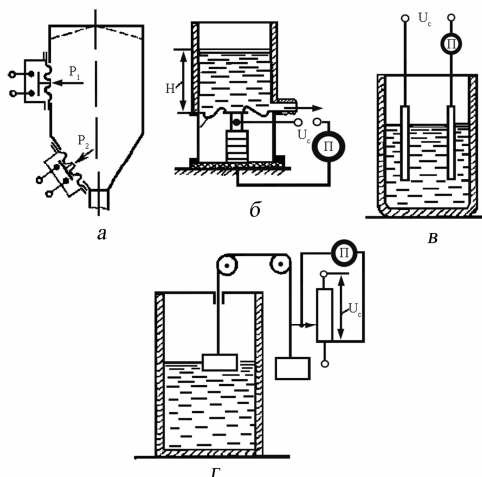


Рис. 192. Датчики рівня:
а, б – мембранні; в – електродний; г – поплавковий

Аналогічно спрацьовують датчики під час вимірювання тиску на мембрану рідини, газу.

Електродні датчики можуть працювати на принципі вимірювання активної чи ємнісної провідності речовин між електродами. Вони прості, економічні, точні, можливе дистанційне вимірювання.

У поплавкових датчиках рух поплавка механічно передається на повзунок потенціометра, який перетворює зміну рівня рідини в пропорційну зміну електричної напруги, що реєструє вимірювальний прилад. Застосовуються для вимірювання кутових швидкостей з допомогою відцентрових тахометрів та тахогенераторів.

У тахометричних датчиках відцентровий пристрій обертається з кутовою швидкістю вала, кутову швидкість якого вимірюють. При цьому за рахунок відцентрової сили грузики розходяться, пружина стискається до тих пір, поки її сила не зрівноважить відцентрову силу F .

$$F = k_T \omega^2 r \quad (H), \quad (281)$$

де k_T – коефіцієнт, що залежить від конструкції тахометра;

ω – кутова швидкість вала;

r – радіус відцентрової системи.

Оберти вала фіксуються лічильним механізмом, проградуєваному в одиницях кутової швидкості, або передають на індуктивний, ємнісний чи резистивний датчики (рис.193).

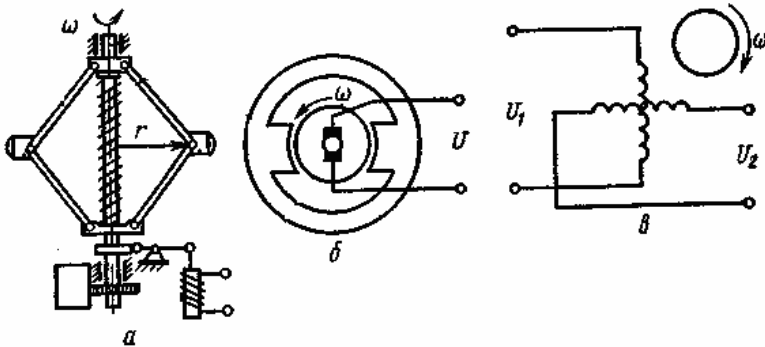


Рис. 193. Датчики швидкості:

а – тахометричний центробіжний; б, в – відповідно тахогенератор постійного і змінного струму.

$$\text{Чутливість датчика } S = \frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial \omega} = 2k_T \omega r. \quad (282)$$

Тахогенератори можуть бути постійного струму з постійними магнітами або з обмоткою збудження змінного струму. У тахогенераторах постійного струму якір обертається в магнітному полі постійних магнітів. Вихідна величина – напруга U на колекторі, пропорційна (коефіцієнт m) до вхідної величини – кутової швидкості $U = m\omega$ (В).

$$\text{Чутливість датчика } S = \frac{\partial U}{\partial \omega} = m \text{ [В} \cdot \text{с/рад]}. \quad (283)$$

Недоліки цих тахогенераторів – наявність щіток, колектора, що знижує їх надійність.

Тахогенератори змінного струму (синхронні) не мають рухомих контактів. Обмотка статора складається з двох обмоток, розміщених у просторі під кутом 90° , одна з яких (обмотка збудження) живиться від мережі змінного струму напругою U_1 , а з другої обмотки одержуємо вихідну напругу U_2 .

Ротор тахометра – алюмінієвий стакан, що обертається між статором і нерухомим циліндричним осердям. Коли ротор нерухомий, напруга U_2 рівна нулю, оскільки вісі обмоток перпендикулярні.

Під час обертання ротора в магнітному полі обмотки збудження наводиться струм, що створює магнітний потік, який пересікає вихідну обмотку, індуючи в ній змінну е.р.с., пропорційну (коефіцієнт m_1) до кутової швидкості ротора.

$$\text{Тобто } U_2 = m_1 \omega U_1 \text{ (В)}.$$

Для вимірювання частоти обертання різних машин та агрегатів останнім часом використовують цифрові автоматичні тахометри (світлове табло в десятковій системі).

Датчики для вимірювання температури різних тіл, середовищ у своїй роботі використовують властивість речовин, матеріалів, що змінюються залежно від температури.

Це може бути зміна об'єму, лінійних розмірів, термо-е.р.с., електропровідності тощо.

Датчики температури можуть бути з механічними вихідними сигналами (тепломеханічні) та з електричними вихідними сигналами (теплоелектричні).

У системах автоматики застосовують датчики: контактні, бі-металічні, термометри опору, напівпровідникові термоопори, термомпари тощо.

Тепломеханічні датчики використовуються в якості сприймаючих елементів, що перетворюють зміну фактичного значення регулю-

k_1 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від матеріалу пластин, її розмірів;

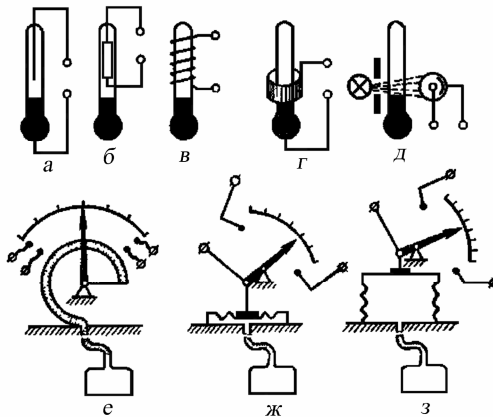
$$k = k_1 \frac{l^2}{\delta} \text{ – чутливість датчика.}$$

Переміщення пластин датчика 0,1–0,15 мм на 1° зміни температури, похибка в межах 1–5%, діапазон вимірювання температури – 60...+450°С.

З контактних термометрів поширені датчики, принцип дії яких ґрунтується на тепловому розширенні рідин та газів.

Так, у колбі ртутного датчика розміщено два контакта: один з'єднаний з стовпчиком ртуті, інший – рухомий, розміщений зверху. Переміщення стовпчика ртуті пропорційно зміні температури середовища буде відповідати певному значенню температури спрацювання датчика. Таким чином, вхідною величиною в ньому є температура, а вихідною – висота стовпчика ртуті в колбі. Застосовується при температурі – 30...+100°С, при розривній потужності 2 Вт і струмі 0,2 А.

Крім таких датчиків застосовують датчики, де всередині колби з ртуттю розміщений резистор, індуктивність L, ємність C тощо, параметри яких змінюються пропорційно до зміни температури (рис. 195).



*Рис. 195. Датчики температури:
а – б – рідинні; е, ж, з – манометричні*

У датчиках манометричних використовують залежність тиску газу чи насиченого пару спеціальної рідини, що знаходиться в замкнутій системі, від температури. Під час зміни температури в

датчиках переміщуються пружини або мембрани і при певній температурі спрацьовують контакти, від чого виникає керуючий сигнал. Рідинні термометри манометричні заповнюють ртуттю, ацетоном, спиртом, ефіром, а газові – азотом, інертним газом. Потужність їх достатня для роботи магнітних пускачів.

Термоелектричні датчики (термопари, металічні терморезистори, напівпровідникові діоди, тріоди) перетворюють зміну цього значення температури в зміну електричного опору, е.р.с. чи струму. Термопара – це спай двох різнорідних металічних провідників чи напівпровідників. Якщо спаяні напівпровідники (провідники) помістити в середовище з різними температурами T_1 і T_2 , то на їх кінцях виникне термо-е.р.с., пропорційна до різниці температур. При $T_2=T_0=0$, величина термо-е.р.с. рівна.

$$E \approx \alpha T_1 + \beta T_1^2 + \gamma T_1^3, \text{ В}, \quad (285)$$

де α, β, γ – постійні коефіцієнти для цієї термопари; чутливість термопари $0,01 \dots 0,07 \text{ мВ/}^\circ\text{С}$ при похибці до 5%.

Для збільшення вихідної напруги часто застосовують послідовне з'єднання термопар. Металічні терморезистори виготовляють з пластин міді, нікелю, вольфраму, залежність опору яких від температури складна

$$R_T = R_0(1 + \alpha T^2 + \beta T^3 + \gamma T^4 \dots), \text{ Ом}. \quad (286)$$

Але користуються спрощеною формулою

$$R_T = R_0(1 + \alpha T), \text{ Ом}, \quad (287)$$

де α, β, γ – коефіцієнти, що залежать від конструкції термопари; R_0 – опір терморезистора при T_0 .

Чутливий елемент терморезистора розміщують в металевому корпусі – це біфілярна обмотка з дроту діаметром $0,04\text{--}0,08 \text{ мм}$.

Чутливість датчика $k \approx \frac{\Delta R_T}{\Delta T}$. Найпоширеніші терморезистори металеві – платинові ТСП, мідні ТСМ.

Напівпровідникові терморезистори (термістори, позістори) конструктивно оформлені у вигляді напівпровідникового стержня або диска в корпусі з виводами.

Залежність опору термістора від температури визначається таким рівнянням:

$$R_T = R_\infty e^{\frac{C}{T}}, \text{ Ом}, \quad (288)$$

де R_∞ – опір термістора при $T \rightarrow \infty$;

C – постійний коефіцієнт, характеризує чутливість терморезистора і визначається за формулою:

$k = \alpha R_T$; $\alpha = -c/T^2$ – температурний коефіцієнт.

Поширені терморезистори мідно-марганцеві ММТ, кобальтово-марганцеві КМТ для температур від -203K до 523K , при чутливості в 5–30 разів вище металевих терморезисторів.

Позистори як терморезистори з додатнім температурним коефіцієнтом у зоні додатніх температур різко збільшують опір до максимального його значення, а потім різко його зменшують. В області від’ємних температур опір позистора із збільшенням температури зменшується. Промисловість випускає позистори: СТ5-1, СТ6-1А, СТ6-3Б та ін.

Терморезистори можуть вмикатися в різні схеми: нереверсивні, мостові, диференційні, при цьому вихідна напруга рівна

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_1 R_H}{R_H + R_{\text{вх}}}, \text{ В.} \quad (289)$$

Для вимірювання температур використовують напівпровідникові діоди Д7А-Д7Ж, малопотужні напівпровідникові тріоди як більш чутливі ($0,4\text{В}/^\circ\text{C}$ проти $2,2\text{ мВ}/\text{град}$).

3. Датчики забезпечення роботи систем двигунів внутрішнього згорання і систем автоматизації роботи сільськогосподарських машин і агрегатів. Найпоширенішими датчиками рівня рідини є поплавкові й електродні, причому їх застосовують тільки для контролю рівня електропровідних рідин.

Поплавкові реле типу РМ-51 призначені для контролю рівня рідин у резервуарах або колодязях. Відстань між верхніми положеннями, які контролюють рівень, може становити від 0,5 до 10 м. Працює поплавкове реле так. Чутливим елементом реле є поплавок. Контактний пристрій реле – це пружний перемикач миттєвої дії з одним замикаючим і одним розмикаючим ртутними контактами. Контактний пристрій реле одночасно замикає одне електричне коло сигнальних або пускових пристроїв і розмикає друге коло, коли рівень рідини сягне між нижнім і верхнім положенням рівня; одне з електричних кіл завжди замкнute, а друге – розімкнute.

Поплавкове реле (рис. 196) складається з поплавка 1 і противаги 10, зв’язаних між собою тросом 5, перекинутим через блок 4. Блок 4 і пружинний перемикач контактів складається з двоплевого важеля 2, вісі 8, повідця 7, пружини 3 і коромисла 6. До коромисла 6 прикріплені ртутні перемикачі. Трос 5 пропущений через прорізи двоплевого важеля 2. При підніманні або опусканні рідини в резервуарі відбувається відповідно піднімання або опускання поплавка. При

цьому переміщується вгору або вниз трос 5 з закріпленими на ньому упорними втулками.

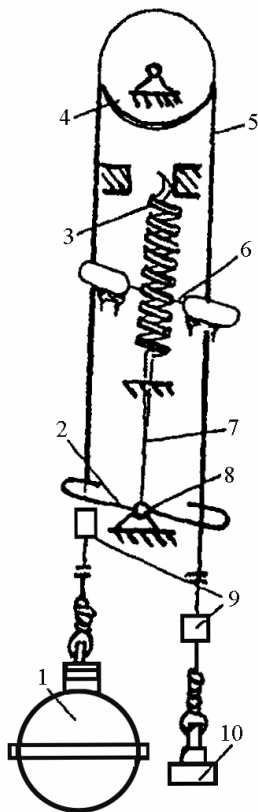


Рис. 196. Поплавкове реле РМ-51:

1 – поплавок; 2 – важіль; 3 – пружина; 4 – блок; 5 – трос;
6 – коромисло; 7 – повідець; 8 – вісь; 9, 10 – противага

Коли рідина в резервуарі досягне заданого рівня, упорна втулка поверне важіль 2, вісь 8 і повідець 7. Повертання повідця 7 за допомогою пружини 3 спричиняє миттєве повертання коромисла 6 із закріпленими на ньому ртутними перемикачами. При цьому один ртутний перемикач замикається, а другий – розмикається. Пружинний перемикач закритий кожухом, в якому закріплені контакти.

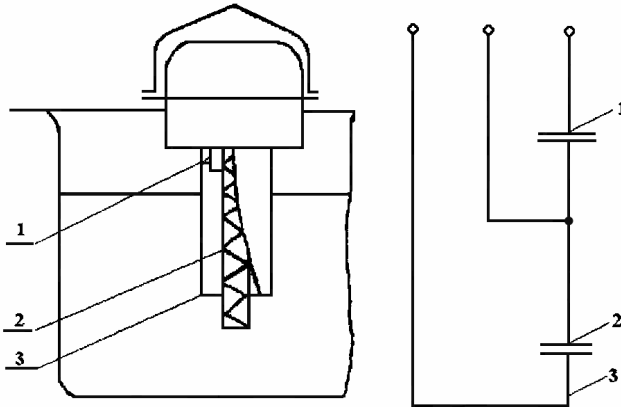


Рис. 197. Схема електродного датчика рівня:
 1 – електрод верхнього рівня, 2 – загальний електрод
 приєднаний до нульового проводу 3 – електроди нижнього рівня

Реле РМ-51 призначене для встановлення в резервуарах для неагресивної рідини з температурою від +5 до +60°C. Розривна потужність контактів становить 300 Вт.

Датчики рівня сипучих матеріалів. Для контролю рівня сипучих матеріалів широко використовуються мембранні датчики типу ДУЗ-1 (датчик рівня зерна), МДУ (мембранний датчик рівня), ДУМ-К/11 (датчик рівня мембранний), а також електронні сигналізатори рівня ЗСУ-2.

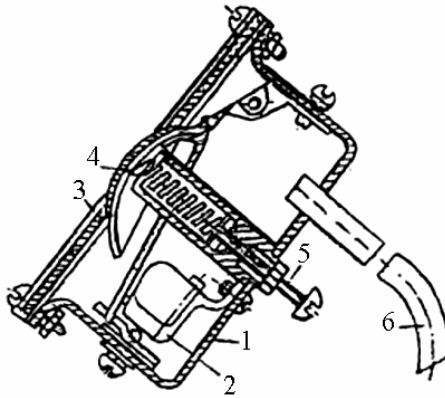
Датчики ДУЗ-1 складаються з алюмінієвого корпусу діаметром 154 мм і висотою 70 мм, в якому розміщені мікроперемикач типу МП-1 і гнучка мембрана з прогумованої тканини із закріпленим на ній металевим диском. Шток мікроперемикача стискається з диском при натисканні зерна на мембрану.

Датчик ДУЗ-1 встановлюють на стінці бункера у вертикальному положенні так, щоб мембрана стискалась із зерном. Мікроперемикач спрацьовує при рівні зерна 0,5–0,6 м, тобто тоді, коли тиск зерна на мембрану становитиме 3...7 Н. Мікроперемикач має один замикаючий і один розмикаючий контакти, які використовуються для вмикання світлової або звукової сигналізації або для керування різними механізмами.

Датчик ДУЗ-1 призначений для роботи при температурі від -20 до +50°C і відносній вологості до 80%. Розривна потужність контактів 80 Вт. Маса приладу 2,5 кг.

Датчик МДУ-3 чутливіший порівняно з датчиком ДУЗ-1. У пластмасовому корпусі датчика розміщений мікроперемикач типу МІІ-3, що має по одному замикаючому і розмикаючому контакту. У цьому датчику мембрана тисне на шток мікроперемикача не безпосередньо, а через важіль і забезпечує підвищену чутливість датчика.

Мікроперемикач спрацьовує при підвищенні рівня зерна над центром мембрани на 100–150 мм. Тиск на мембрану, при якому спрацьовує мікроперемикач, становить 0,4–0,5 Н. Контакти мікроперемикача допускають навантаження струмом до 2 А при напрузі 220 В.



*Рис. 198. Датчик рівня зерна ДУМ-100К/11:
1 – корпус; 2 – мікроперемикач; 3 – мембрана;
4 – пружина; 5 – регульований гвинт; 6 – патрубок*

Для сигналізації про спрацьовування мікроперемикача в корпус датчика вмонтована комутаторна лампочка на напругу 60 В.

Датчик МДУ-3 використовується для контролю наявності зерна у самопливах. Для контролю рівня зерна застосовують датчик МДУ-3С. Він виконаний у литому корпусі і не має світлового сигналізаційного пристрою. В усьому іншому обидва датчики подібні.

Датчики типу ДУМ-100К/11 (рис. 198) призначені для контролю заповнення зерном і відходами бункерів на зерноочисних і зерноочисно-сушильних агрегатах типу ЗАВ-10, ЗАВ-20, КЗС-10 і КЗС-20.

Як датчики частоти обертання валів у системах електроавтоматики використовують тахогенератори постійного і змінного струму, а також різної конструкції реле частоти обертання.

Тахогенератори постійного струму – це невеликі генератори. Більшість цих мікромашин має обмотку збудження з номінальною напругою від 27 до 110 В (ТГ-1, ТГ-2, ТГ-3, СЛ-121, СЛ-161, СЛ-221, СЛ-261, ТД-101ДД-102, ТД-103, ТД-201 та ін). Інші тахогенератори збуджуються від постійних магнітів (ЭТ-4/110, ЭТ-7/110, МЭТ-8/55, ТД-201ПМ, ТД-ЮЗПМ, ТПП-1 та ін). Напруга на затискачах тахогенераторів прямо пропорційна до частоти обертання вала, що контролюється. Питома напруга становить від 20 до 130 В на кожную 1000 хв⁻¹. Максимальна частота обертання для різних типів тахогенераторів становить від 1000 до 4500 хв⁻¹. Машини можуть надійно працювати при змінах температури навколишнього середовища в широких межах (від -40 до +70°С).

Тахогенератори змінного струму за принципом дії поділяються на синхронні і асинхронні. Синхронні тахогенератори – це невеликі за розміром однофазні мікромашини, як правило, з постійним магнітом. Вони прості за будовою і виготовленням, безвідмовні в роботі і порівняно недорогі. Проте синхронні тахогенератори мають один істотний недолік: при зміні частоти їх обертання змінюється не тільки напруга, а й частота сигналів, що генеруються, а це небажано з точки зору живлення елементів автоматичних систем.

Асинхронні тахогенератори, на відміну від звичайних асинхронних машин, мають короткозамкнений ротор у вигляді порожнистого тонкостінного циліндра з немагнітного матеріалу (дюраль, бронза). На статорі тахогенератора розміщені дві обмотки, зсунуті одна від одної на 90 електричних градусів. Одна обмотка призначена для подачі живлення від мережі (обмотка збудження), а в другій при обертанні ротора виникає електрорушійна сила руху, яка при постійному потоці збудження пропорційна частоті обертання ротора.

Тахогенератори змінного струму розраховані на максимальну частоту обертання 2400–9000 хв⁻¹, питома електрорушійна сила їх становить 8В...11В на 1000 хв⁻¹.

Напруга живлення обмоток збудження від 110 до 127 В при частоті струму 50, 400 і 500 Гц (для різних типів тахогенераторів).

Для контролю справності обладнання, що має обертові частини, у ряді випадків застосовують датчики обертового руху, до яких належить реле типу РСІ, РКС, РС-2м.

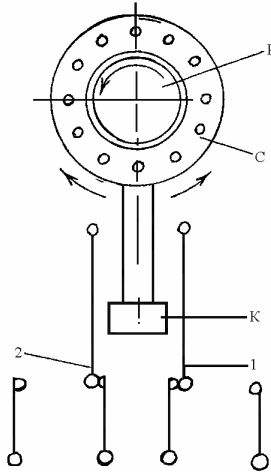


Рис. 199. Конструктивна схема реле РКС:

P – ротор; С – статор; К – колодочка; 1 і 2 контактні групи

На рис. 199 подано реле контролю швидкості РКС. Ротор Р реле – це круглий постійний магніт, з'єднаний з контрольованим валом за допомогою муфти. Статор С типу білячого колеса має електромагнітний зв'язок з ротором. На статорі жорстко закріплена колодочка К. Під час обертання контрольованого вала обертається і ротор Р. При цьому на статор передається обертальний момент, і статор з колодочкою відхиляється на деякий кут. Колодочка діє на праву або ліву контактну групу (залежно від напрямку обертання). При малій частоті обертання ротора він практично перестає діяти на статор і колодки повертаються у вихідне положення.

Реле РКС вмонтоване в алюмінієвий корпус, який кріпиться нерухомо. РКС надійно працює при частоті обертання контрольованого вала близько 1000 об/хв.

Контрольні запитання

1. Призначення датчиків систем автоматики.
2. Як поділяють датчики за принципом дії?
3. Принцип дії параметричних датчиків.
4. Як працюють генераторні датчики?
5. Навести приклади застосування резистивних датчиків.

-
6. Навести приклади застосування індуктивних датчиків.
 7. Навести приклади застосування ємнісних датчиків.
 8. Що розуміють під “магнітопружинними датчиками”?
 9. Як працюють фотоелектричні датчики?
 10. Принцип датчиків рівня та їх застосування.
 11. Як працюють датчики кутової швидкості та їх застосування?
 12. Принцип дії датчиків температури, їх типи.
 13. Застосування в об’єктах автоматики терморезисторів, позисторів.

2.10. ПРОГРАМНІ ПРИСТРОЇ, ЗАДАВАЧІ ТА ЕЛЕМЕНТИ ПОРІВНЯННЯ

1. Програмні пристрої та реле часу.
2. Задавачі.
3. Елементи порівняння: потенціометричні схеми порівняння двох напруг, мостові схеми порівняння, магнітні порівнювальні пристрої, порівнювальні пристрої слідкуючих систем.

1. Програмні пристрої і реле часу. Для автоматизації вмикання, вимикання автоматизованих установок у певній послідовності за часом, використовують різні програмні пристрої та реле часу.

Програмні пристрої відрізняються між собою в основному видом приводного механізму: електричні з синхронним мікродвигуном; годинникові з ручним заводом пружини; годинникові з автоматичним підзаводом пружини від мікродвигуна.

Найпростіший програмний пристрій – реле часу типу РВ, що встановлені в схемах автоматики інкубаторів типу “Універсал”.

Приводним механізмом у цьому реле є однофазний синхронний двигун типу СД-2 з вбудованим редуктором, вихідний вал якого обертається зі швидкістю 2хв^{-1} , а додатковий редуктор забезпечує зменшення обертів вала до одного оберта за чотири години. Цей вал обертає фасонний пластмасовий диск, товщина якого має невелику площу, а друга половина – значно більшу. При ковзанні пружинної пластини по більшому півколу вона вмикає мікроперемикач типу КВ-9А, а при ковзанні по малому півколу пластина відпускає контакти мікроперемикача. У такий спосіб через кожні одну або дві години забезпечується поворот лотків на 45° у той чи інший бік від вертикалі.

Складнішим є програмний прилад КА-24, який завдяки наявності зовнішнього і внутрішнього редукторів обертає програмний

диск зі швидкістю 1 оберт за добу. На програмному диску з інтервалом в 15 хвилин встановлені штіфти, які при висуванні забезпечують ввімкнення кіл автоматичного керування в заданий час через 15 хв. Тривалість ввімкнення можна регулювати від 15 хв до 24 год. Прилад КА-24 – це моторне реле часу з добовою програмою.

Багатоколові командні прилади КЭП-12У, МКП – регулюють за часом у заданій послідовності, тривалості різні технологічні операції за даним графіком шляхом вмикання, вимикання до 12 електричних чи пневматичних кіл; з витримкою від 3 хв до 18 год (КЭП-12У) та від 30 с до 24 год (МКП) при потужності контактів 500 ВА.

Програмні реле часу ВС-10 – це моторні реле, які крім двигуна мають електромагнітну муфту зчеплення. Випускають на напругу 12, 127, 220 В (табл.6).

Реле часу електромеханічне РВ-4 передає електричні сигнали з одного кола керування в інше з певним, попередньо встановленим запізненням, що регулюється в загальному від 2 до 60 с у реле РВ-4-1 до 10–240 хв у реле РВ-4-5.

Складається реле з мікродвигуна з редуктором, електромагніту, групи контактів замикаючих, розмикаючих (без витримки часу і з заданою витримкою) з струмом до 4А. Похибка програмних реле – до 15 хв на добу, крім того відключення при перервах в електропостачанні.

Програмне реле 2РВМ – електромеханічний прилад з анкерно-годинниковим механізмом з автоматичним під заводом пружини від мікродвигуна, програмного диска, трьох мікроперемикачів і двох проміжних реле.

Таблиця 6

Технічні дані програмних реле часу ВС-10

Марка реле	Межі витримки часу	Похибки реле, с	Мінімальний інтервал між сусідніми величинами уставки, с
ВС 10-31	2...60 с	0,2	1,5
ВС-10-32, ВС-10-62	5...180 с	0,7	5
ВС-10-33, ВС-10-63	15...540 с	2	15
ВС-10-34, ВС-10-64	1...30 хв	7	45
ВС-10-35, ВС-10-65	3...90 хв	20	120
ВС-10-36, ВС-10-66	9...270 хв	60	360
ВС-10-37, ВС-10-67	24...16000 хв	120	1080
ВС-10-38, ВС-10-68	1...24 год	300	2703

Програмний диск обертається з швидкістю 1 оберт за добу. На диску є два концентрично розташовані різьбові отвори для штифтів (їх встановлюють згідно з програмою), які за допомогою важелів вмикають, вимикають мікроперемикачі кожної з програм, керуючи даними проміжного реле. (рис.200).

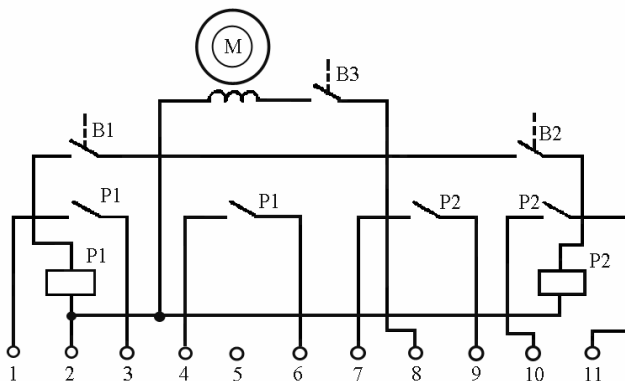


Рис. 200. Електрична схема програмного реле 2PBM

При розкручуванні пружини годинникового механізму третій мікроперемикач автоматично вмикає мікродвигун підзаводу, якого вистачає на добу. Похибка програм ± 5 хв.

2. Задавачі. Під час автоматизації технологічних процесів система автоматики повинна або підтримувати контрольовані параметри на заданому рівні (системи стабілізації), або змінювати ці параметри за задалегідь заданими функціями (програмні системи), або керовані параметри залежно від зміни попередньо невідомої величини на входах (системи слідкуючі). Для здійснення команд керування в цих системах використовують задавачі і елементи порівняння.

Задавачі системи автоматики служать для встановлення заданого значення, керованої (регульованої) величини або потрібного закону її зміни. Електричні аналогові задаючі пристрої неперервної дії – це потенціометри змінного опору, індуктивності з рухомим осердям, конденсатори змінної ємності, котушки магнітних підсилювачів тощо. Задане значення керованої величини встановлюють вручну або від програмних пристроїв. Закон формування заданого сигналу визначається відповідним профілем потенціометра, феромагнітного

осердя, обкладок конденсатора тощо. Задавачі можуть бути аналогові (неперервні, дискретні) та цифрові.

Прикладом електромеханічних задаючих пристроїв неперервної дії можуть бути сельсіни, а дискретної дії – програмні реле, крокові шукачі й інші, що використовуються в програмних системах керування. У гідравлічних, пневматичних задаючих пристроях задану величину встановлюють шляхом зміни сили протидіючої пружини, зміною положення засувки, зміною проходних діаметрів сопел, золотників тощо.

Також як задаючі пристрої використовують електронні обчислювальні пристрої автоматики.

3. Елементи порівняння: потенціометричні схеми порівняння двох напруг, мостові схеми порівняння, магнітні порівнювальні пристрої, порівнювальні пристрої слідкуючих систем. Елементи порівняння систем автоматики порівнюють фактичне значення керованої величини із заданими значеннями і при їх неузгодженості видають керуючий сигнал з метою усунення цього неузгодження.

На функціональних, структурних схемах задаючі і порівнювальні елементи зображуються, як правило, разом. Залежно від фізичної природи сигналів, що підлягають порівнянню, застосовують порівнювальні пристрої з використанням електричного, магнітного, механічного, пневматичного, гідравлічного та інших принципів дії.

Електричне порівняння – це порівняння в одному колі двох е.р.с., ввімкнених назустріч одна одній, – тієї, що відповідає заданому значенню, і тієї, яка відповідає фактичному значенню контрольованої величини. Якщо порівнюють не е.р.с., а струми, їх пропускають по двох опорах і порівнюють за допомогою зустрічного ввімкнення спадів напруг на цих опорах. Результатом порівняння в обох випадках буде певна невелика напруга, знак якої залежить від різниці між абсолютними значеннями заданого і фактичного значення напруги.

Можуть порівнюватися синусоїдальні величини різних частот або діючі значення синусоїдальної та постійної величин. Порівняння двох електричних величин за фазою застосовують лише для синусоїдних величин однакової частоти.

Як аналогові, цифрові порівнювальні пристрої використовують також обчислювальні пристрої автоматики (Рис.201).



Рис. 201. Класифікація порівнювальних пристроїв

У деяких випадках при цьому дві величини задаються у вигляді N -розрядних двійкових чисел, що записуються в регістри. Вони зрівнюються за допомогою спеціальних схем порозрядно. Умова рівнозначності чисел A і B ($A=B$) – рівнозначність всіх одноіменних розрядів, а умова їх нерівнозначності ($A>B$ або $A<B$) – нерівнозначність хоча б в одному з розрядів, тобто двійкові числа повинні бути рівні з точністю до розряду.

Для цього складають логічну схему з трьома виходами: F_1 , F_2 , F_3 , відповідно до випадків $A>B$, $A<B$, $A=B$. При порівнянні двох одно-розрядних чисел ці функції мають вигляд $F_1=AB$ $F_2=AB$ $F_3=AB+AB$.

Таблиця 7

Значення вихідних функцій

A	B	F_1	F_2	F_3
		$A>B$	$A<B$	$A=B$
0	0	0	0	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
0	1	0	1	0

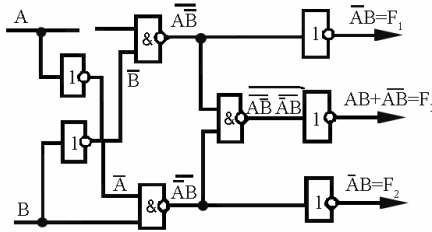


Рис. 202. *Схема порівняння двох однорозрядних чисел*

Як приклад електричного порівнювального пристрою розглянемо потенціометричну схему порівняння двох напруг та двох зустрічних магнітних потоків (рис. 203).

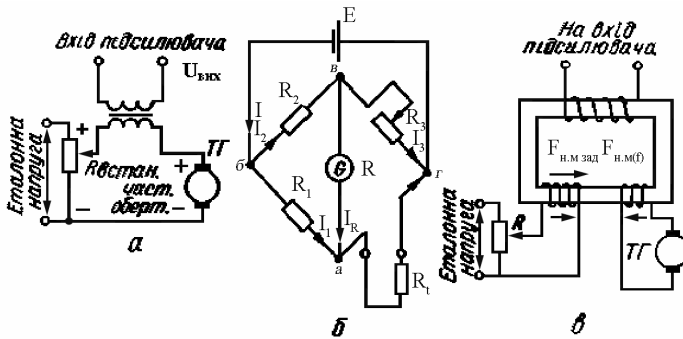


Рис. 203. *Елементи порівняння:*

- а – схема порівняння напруг; в – схема порівняння магнітних потоків;*
- б – мостова схема; ТГ – тахогенератор; G – гальванометр;*
- R₁ – датчик; R₃ – задавальний потенціометр*

Тут порівнюють напругу, яка відповідає заданому значенню, та напругу, що відповідає фактичному значенню і передається від тахогенератора (датчика оборотів).

Різниця цих напруг подається на обмотку трансформатора, піднімається і може бути вхідною у керуючий пристрій.

Часто в схемах автоматики застосовують порівнювальний пристрій, виконаний за самою. В одну з діагоналей моста включене джерело напруги E, в іншу – гальванометр. Задатчиком температури

тут використовують змінний опір R_3 , а датчиком температури – терморезистор R_t .

Опори R_1 і R_2 постійні. Якщо міст урівноважений ($R_1 R_2 = R_3 R_t$), вихідна напруга рівна нулю, стрілка гальванометра не відхиляється. При зміні температури, змінюється R_t , міст виходить з рівноваги $U_{ab} \neq 0$, гальванометр показує деякий струм, тим більший, чим більше порушена рівновага моста, тобто чим більша різниця між опорами заданим і фактичним.

У магнітному порівнювальному пристрої порівнюється два зустрічних магнітних потоки або ампервитки $F_{н.м.зад.}$ і $F_{н.м.(f)}$. Одна з обмоток живиться від еталонної наруги, інша – від фактичної наруги тахогенератора. В усталеному режимі ампервитки двох обмоток урівноважені, сигнал на виході відсутній. При порушенні рівноваги (напруги еталонна і фактична різні), у вихідній обмотці наводиться е.р.с., що підсилюється і подається на керуючий пристрій. У слідкуючих АРС роль елемента порівняння виконує датчик неузгодженості, який буває у вигляді механічного чи електричного диференціала (наприклад диференціального сельсина).

Контрольні запитання

1. Призначення програмних пристроїв та які основні відмінності між ними?
2. Будова, робота моторних програмних реле.
3. Коротка характеристика, сфера застосування програмних приладів КА-24, ВС-10, РВ-4.
4. Призначення задавачів систем автоматики, їх типи, приклади застосування.
5. Призначення елементів порівняння в системах автоматики, їх типи.
6. Як працюють електричні порівняльні пристрої (навести їхні принципові схеми)?
7. Поняття про аналогові та цифрові порівняльні пристрої.
8. Як працює магнітний порівняльний пристрій?

2.11. ВИКОНАВЧІ ЕЛЕМЕНТИ І РЕЛЕ АВТОМАТИКИ

1. Загальні відомості про виконавчі елементи автоматики, їх класифікація.
2. Електричні виконавчі елементи: електродвигуни постійного, змінного струму, електромагнітні пристрої системи пуску та подачі

палива у двигунах внутрішнього згорання і систем автоматичного водіння сільськогосподарських машин.

3. Реле: електромагнітні, нейтральні, поляризовані, електронні, геркони, електронні ключі.

1. Загальні відомості про виконавчі елементи автоматики, їх класифікація. Виконавчі елементи – це кінцеві ланки систем автоматики, що служать для переміщення робочого органа (клапани, засувки, крани тощо) у відповідності із сигналами, що надходять від керуючого пристрою та діють на керований об'єкт. За фізичною природою діляться на електричні, гідравлічні, пневматичні, механічні, електродвигунові, електронні, поршневі, мембранні тощо.

У загальному випадку складаються з джерела енергії (двигун, муфта, електромагніт тощо), передаточного чи перетворюючого пристрою, кінцевих вимикачів, пускозахисної апаратури, сигналізації, контролю тощо (рис. 204).

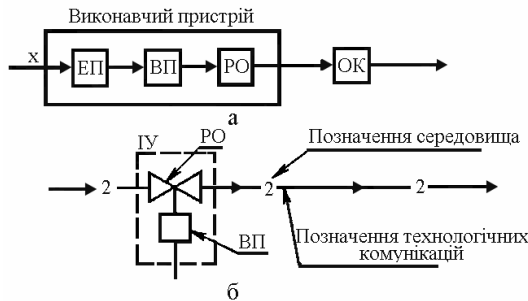


Рис. 204. Виконавчі пристрої:

а – структурна схема; б – позначення елементів виконавчого пристрою на функціональній технологічній схемі

Основні параметри виконуючих пристроїв: номінальний момент на вихідному валу, штоку; його максимальне значення; зона нечутливості; величина вибігу (переміщення після відключення) та вільного ходу. Важливим показником виконавчого механізму є їх статичні і динамічні характеристики. За своїми динамічними властивостями виконавчий механізм – це інтегруюча ланка і для перетворення в пропорційну ланку, де положення вихідного органа пропорційне до вхідного сигналу, виконавчий механізм охоплюють місцевим жорстким зворотним зв'язком. У сільському господарстві

найпоширеніші електричні виконавчі механізми: електромагнітні і електродвигунові.

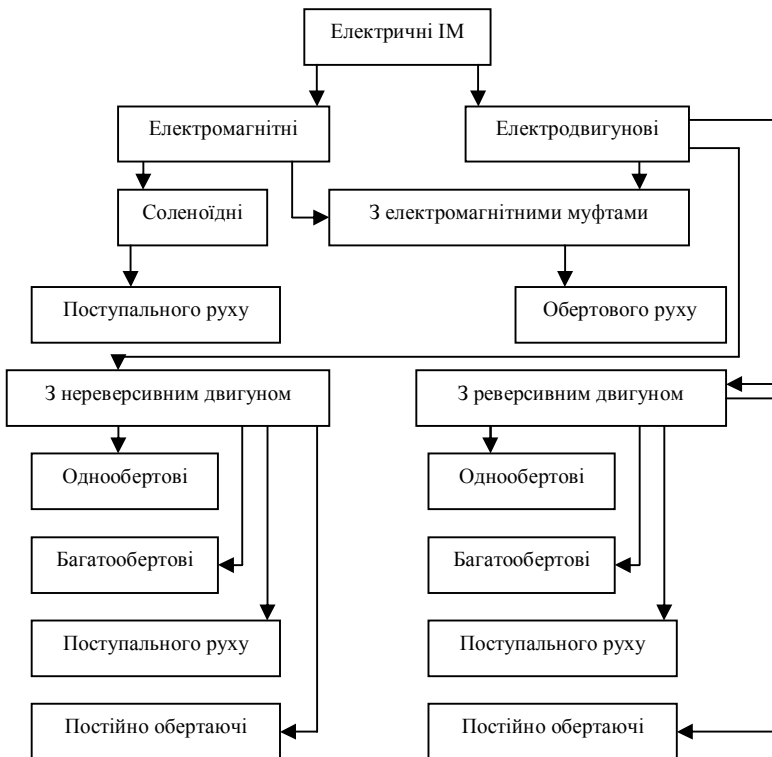


Рис. 205. Класифікація електричних виконавчих механізмів за характером застосування вихідного пристрою

2. Електричні виконавчі елементи: електродвигуни постійного, змінного струму, електромагнітні пристрої системи пуску та подачі палива у двигунах внутрішнього згорання і систем автоматичного водіння сільськогосподарських машин. Для переміщення різних робочих органів застосовують електродвигунові виконавчі органи клапанів, засувок, кранів тощо, що працюють у комплекті з відповідними регуляторами системи автоматики. Простота схем, мале число елементів, що беруть участь у формуванні керуючої дії, високі експлуатаційні властивості забезпечують широке застосування

цих виконавчих пристроїв у системах автоматики. У сільському господарстві застосовують загальнопромислові електродвигунові виконавчі механізми (ВМ) типу МЕО та спеціалізовані для керування засувками, перекидними клапанами типу ТЕА, Е8-УРВ, ПР-М.

Так ПР-1М переміщує вихідний пристрій ВМ із одного крайнього положення в інше за 10, 30, 60, 90, 120 с при крутному моменті 10 Н·м, положення вихідного вала – горизонтальне.

Механізми виконавчі типу ІМТМ служать для швидкого переміщення робочого органу в системах позиційного регулювання при крутному моменті двигуна 40 Н·м і часі одного оберту вала 2,5 с.

Різні ВМ використовують однофазні конденсаторні і двофазні конденсаторні двигуни з пустим ротором, при потужності до 500 Вт і трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором при потужності більше 500 Вт. Однофазний реверсивний конденсаторний двигун керується вручну кнопками SB1-SB2 та кінцевими вимикачами SQ1-SQ2.

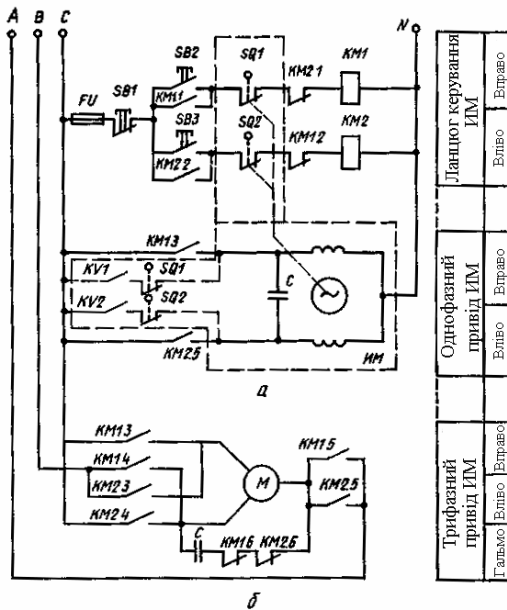


Рис.206. Принципові схеми керування електродвигунами виконавчих механізмів:

а – однофазний привід виконавчого механізму;

б – трифазний привід виконавчого механізму

У схемі керування трифазним двигуном використовують конденсатор С для швидкої зупинки (гальмування) двигуна після вимикання. Розроблені промисловістю ВМ з постійною швидкістю обертання вала з функціями: дистанційний або автоматичний пуск, зупинка двигуна в будь-якому положенні робочого органу, вимикання при аварійних режимах, світлова сигналізація положень робочого органу, блокування тощо.

Вибір електродвигунів для виконавчих механізмів проводять за їхніми статичними характеристиками: швидкісна $n=f(I)$ та механічна $n=f(M)$, з яких видно зміну струму I та момент M двигуна від обертів його.

Електродвигуни ВМ до 20–30 Вт мають електромеханічну сталу часу $T_{\mu}=0,02-0,2$ с, а це значить, що двигун є елементом автоматики досить інерційним.

Електродвигуни постійного струму застосовують з незалежним збудженням або з постійними магнітами: однообертові, багатообертові МЕМ, прямоходові МЕР.

У системах автоматики широко застосовують в якості виконавчих механізмів (ВМ) електромагнітні приводи, що перетворюють електричну енергію в поступальний рух робочого органу (РО). Їх використовують для керування різними регулюючими і запірними клапанами, вентилями, золотниками тощо. Розрізняють ВМ – прямоходові електромагніти з прямолінійним рухом та електромагнітні муфти з обертовим рухом. Вихідною величиною електромагнітів може бути переміщення, швидкість, зусилля, а для муфт: кут повороту, частота обертання, обертовий момент. Вхідною величиною (керуючою дією) електромагнітних ВМ є струм обмотки, що створює магніторушійну силу (а значить і тягове зусилля). Ходові електромагніти виготовляють змінного (однофазні і трифазні) і постійного струму.

Їх характеристики (хід якоря, час спрацювання) залежить від переміщення якоря і тягового зусилля.

Вимоги до електромагнітів: число циклів спрацювання повинно бути не менше допустимих; простота обслуговування; економічність.

Вибирають електромагніти за струмом, потужністю, напругою, враховуючи нагрів до 85...90°C. Простота конструкції електромагнітів дає можливість керувати нескладними електричними схемами.

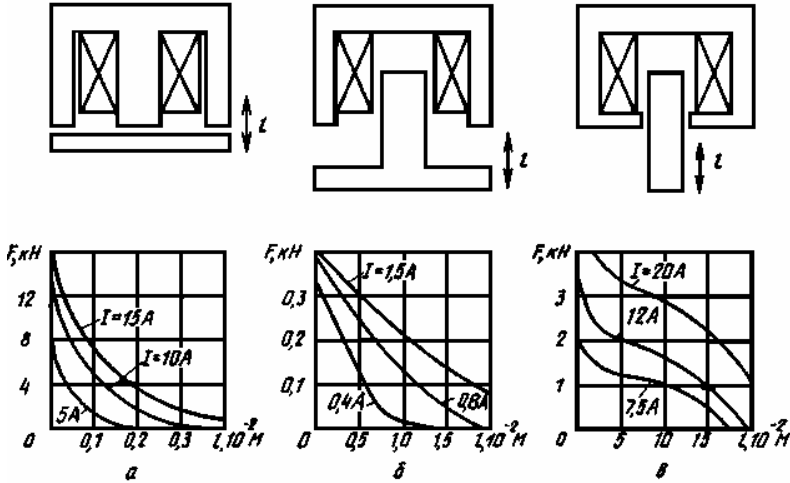


Рис.207. Форми магнітопроводів (осердів) і тягові характеристики електромагнітів:
a – короткоходових; б, в – довгоходових

Для створення значних зусиль при певних переміщеннях робочий струм котушки різко зростає, тому такі електромагніти стають громіздкі і невідгідні. При однакових розмірах електромагніти постійного струму розвивають більшу потужність, чутливіші, стабільніші, простіші конструктивно. Однак в системах автоматики можливості використання електромагнітів змінного струму ширші, і часто електромагніти постійного струму є електромагнітами змінного струму із вбудованими випрямлячами, що працюють як одне ціле з клапанами, вентилями тощо.

На напругу 127, 220, 380 В змінного струму та 110, 220 В постійного струму працюють ВМ типу ЭВ-1, ЭВ-2, але при роботі постійно споживають енергію, і можуть самовільно вимикатися при зникненні напруги.

Електромагнітні ВМ типу ЭВ-3 розраховані на короточасні режими роботи і мають два електромагніти: тяговий (робочий) і утримуючий із заскочкою і знаходяться під напругою лише в момент переключення клапанів, золотників тощо.

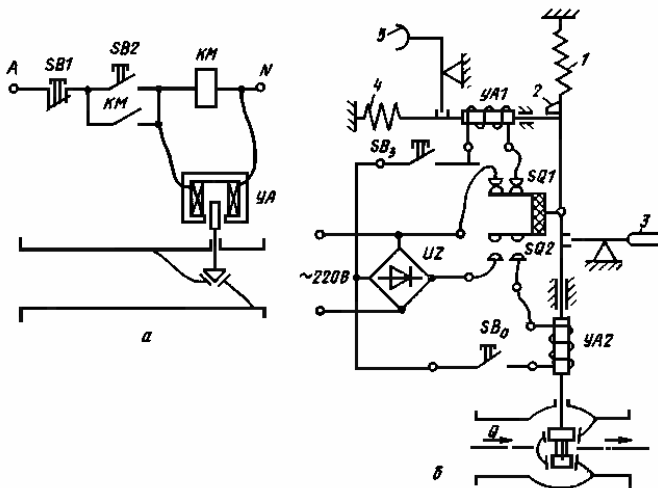
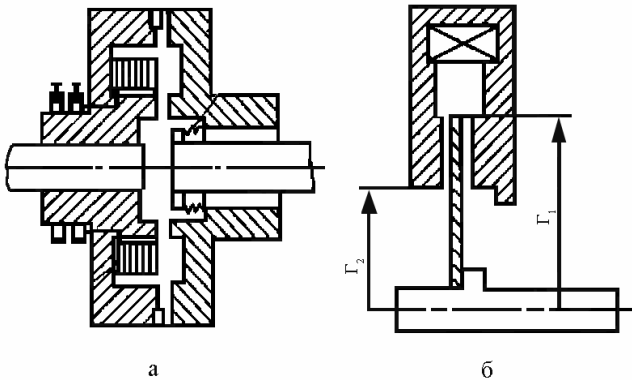


Рис. 208. Схема керування електромагнітами:
а – для тривалого режиму, б – для короточасної роботи;
1 – зворотна пружина; 2 – заціпка; 3, 5 – пристрій керування
вручну робочим органом; 4 – зворотна пружина заціпки

Електромагнітні муфти – це ланка зв'язку між приводом та робочим механізмом, принцип дії яких оснований на електромагнітних властивостях елементів муфти.

Залежно від виду зв'язку муфти бувають: фрикційні сухого тертя, в'язкого тертя, індукційні. Вимоги до них: відповідати певному режимі роботи; мати необхідну потужність, коефіцієнт передачі, надійність, простоту, економічність.

Муфта сухого тертя (рис.209,а) має дві полумуфти – ведучу і ведену, зв'язаних з валами, та обмотки, на які подається керуюча напруга – при цьому виникає електромагнітна сила, муфти прижимаються між собою і за рахунок тертя передається крутний момент.



*Рис. 209. Конструктивні схеми електромагнітних муфт:
а – сухого тертя; б – в'язкого тертя*

Основні характеристики муфти сухого тертя типу ЭМ-12, ЭМ-32 тощо такі: максимальний момент, найбільша частота обертання, потужність котушки, Вт.

Муфти в'язкого тертя (мал. 209,б) – між ведучим і веденим елементом є магнітний порошок, так що із збільшенням магнітного потоку (намагнічування порошку) зростає крутний момент. Такі муфти не бояться перевантаження, швидкодіючі ($T_m=0,005\dots 0,008с$) з коефіцієнтом передачі $k=3500$.

Електромагнітні муфти ковзання (ЕМК) – сукупність двох обертових муфт, одна з яких ведуча має обмотку збудження, друга – ведена – короткозамкнуту обмотку (як в роторі асинхронного електродвигуна).

Принцип роботи ЕМК аналогічний роботі асинхронного двигуна. У малопотужних муфтах серії ПМС можлива зміна частоти обертання в межах 1:8 при крутному моменті 1,7...20 Н·м. Часто привід з ЕМК застосовують для робочих механізмів – насосів, вентиляторів.

Експлуатуються багато автомобілів іноземного виробництва із системою впорскування палива (інжектором), що дає змогу підтримувати оптимальний склад суміші (повітря+паливо), оптимальне наповнення циліндрів на різних режимах роботи двигуна, збільшити економічність, надійність його роботи, зменшення СО у відпрацьованих газах. Так, у системі пуску двигуна “К-jetronic” застосовують термореле, що визначає нагрів двигуна. Якщо він прогрітий, то

термореле вмикає пускову форсунку з електромагнітним керуванням (рис. 210).

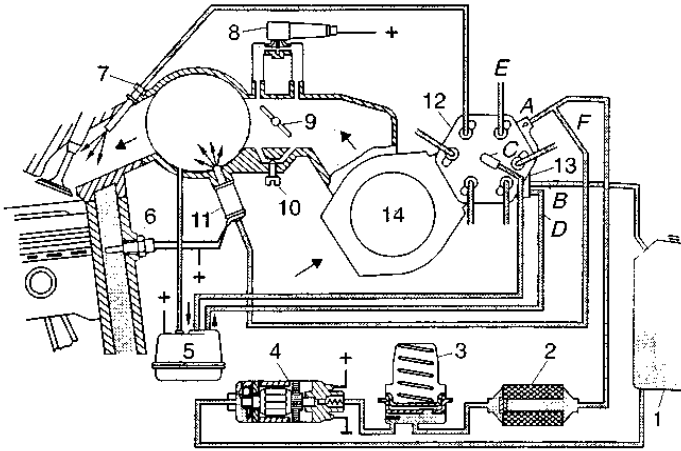


Рис. 210. Схема системи пуску двигуна:

- 1 – паливний бак; 2 – фільтр паливний; 3 – нагромаджувач палива;
- 4 – паливний електронасос; 5 – регулятор керуючого тиску;
- 6 – термореле; 7 – форсунка впорскування; клапан додаткового повітря;
- 9 – заслінка дросельна; 10 – гвинт холостого ходу;
- 11 – пускова електромагнітна форсунка; 12 – дозатор розподільник;
- 13 – регулятор тиску живлення; 14 – витратомір повітря

Тривалість роботи пускової форсунки визначається залежно від температури охолодної рідини. Якщо двигун прогріто, то термореле, пускова електромагнітна форсунка і клапан додаткового повітря не працюють (взагалі вони працюють лише під час роботи статора). Електронасос, регулятор керуючого тиску (забезпечує пуск двигуна, холостий хід та роботу при повному навантаженні), клапан додаткового повітря вмикаються керуючим реле при ввімкненому запаленні. Якщо двигун не запускається протягом 10...15 с, то термореле вмикає пускову форсунку, щоб двигун не “залило”. Електричну схему системи “K-jetronic” із реле пуску холодного двигуна подано на рис. 211.

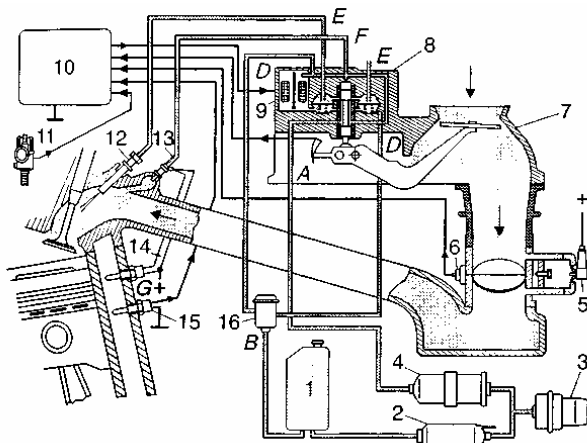


Рис. 212. Схема системи впорскування палива “KE-jetronic”:

- 1 – паливний бак; 2 – насос; 3 – нагромаджувач палива; 4 – фільтр;
 5 – клапан додаткової подачі повітря; 6 – вимикач положення дросельної заслінки; 7 – витратомір повітря; 8 – дозатор розподільник палива;
 9 – електрогідравлічний регулятор керуючого тиску; 10 – блок керування;
 11 – датчик розподільник; 12 – форсунка інжектор; 13 – пускова електромагнітна форсунка; 14 – термореле; 15 – датчик температури рідини; 16 – регулятор тиску палива

Застосований датчик температури охолоджувальної рідини відмінний від термореле, як термоелектричного вимикача і є термоприливний опір з від’ємним температурним коефіцієнтом (тобто в холодного датчика опір більший ніж у нагрітого). Електронний блок керування реагує на поточну температуру двигуна у вигляді опору датчика і видає команду на електрогідравлічний регулятор керуючого тиску відносно складу суміші. Електромагнітний дозатор-розподільник (рис.213) кількості палива керується витратоміром повітря та електрогідравлічним регулятором керуючого тиску.

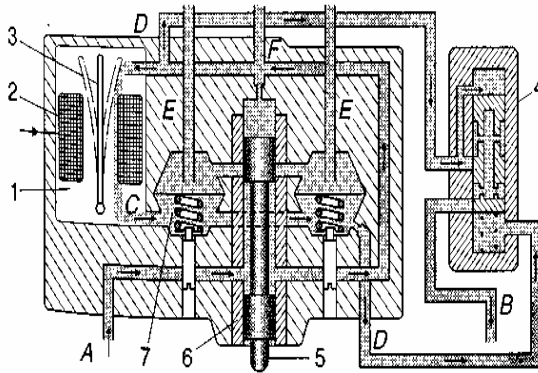


Рис. 213. Дозатор-розподільник і регулятор керуючого тиску:
 1 – електрогідравлічний регулятор керуючого тиску; 2 – обмотка клапана;
 3 – біметалева пластина електроклапана; 4 – регулятор тиску палива;
 5 – плунжер-розподільник; 6 – гільза розподільник;
 7 – диференціальний клапан

На деяких автомобілях для забезпечення раціонального дозування палива застосовують зворотний зв'язок, коли в електричний блок керування подаються сигнали від спеціальних лямбд-зондів (датчики кисню), розмішених у випускному трубопроводі. Сигнали від цих зондів надходять в електричний блок керування, який видає команди регулятору керуючого тиску з метою регулювання якості суміші. Датчики кисню працюють у діапазоні температур 350÷900°С. Виготовляють цирконієві датчики (керамічний елемент на основі діоксиду цирконію ZrO_2 , покритий платиною) – гальванічні джерела струму, що змінюють напругу залежно від температури та вмісту кисню в середовищі.

Поширені титанові датчики, які виготовляють у вигляді резисторів, опір яких змінюється залежно від температури та вмісту кисню в навколишньому середовищі. Їх обігрівають з метою включення в роботу, коли температура відпрацьованих газів нижча від 350°С. Датчики дають можливість зменшити токсичність випускних газів, оптимізувати режими роботи двигуна. Електричну схему впорскування наведено на рис. 214.

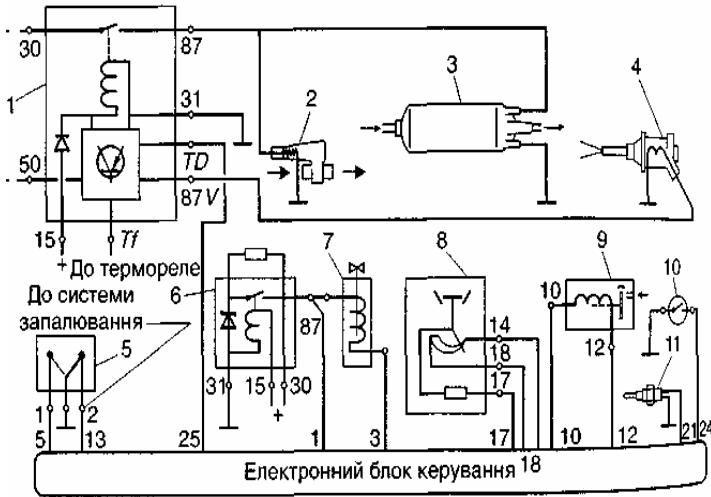


Рис. 214. Електрична схема впорскування палива “KE-jetronic”:
 1 – керуюче реле; 2 – клапан додаткового повітря; 3 – насос палива;
 4 – пускова форсунка; 5 – вимикач дросельної заслінки; 6 – реле перевантаження;
 7 – регулятор холостого ходу; 8 – витратомір повітря; 9 – електродіагностичний регулятор керуючого тиску; 10 – вимикач холостого ходу; 11 – датчик температури рідини

Більш досконалою системою впорскування палива є керована електронним блоком система багатоточкового переривчастого впорскування палива “L-jetronic”. В ній відсутні дозатор-розподільник і регулятор керуючого тиску – всі форсунки пускові та робочі з електромагнітним керуванням.

Тиск палива пари приблизно в 2 рази менший і підтримується постійним регулятором тиску. Кількість палива визначається електронним блоком залежно від температури, тиску, об’єму повітря, частоти обертання колінчастого вала, навантаження двигуна та температури охолоджувальної рідини.

Інформація про навантажувальний режим двигуна в електронний блок регулювання видає вимикач положення дросельної заслінки у вигляді “холостий хід”, “часткові перевантаження”, “повне навантаження”.

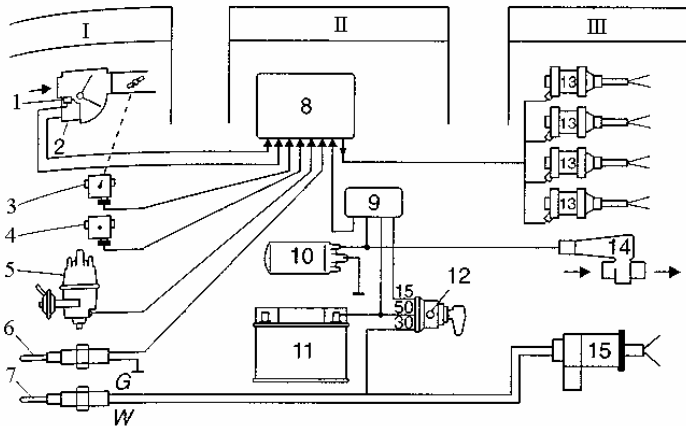


Рис. 215. Функціональна схема керування системою впорскування
 1 – датчик температури повітря; 2 – витратомір повітря; 3 – вимикач положення дросельної заслінки; 4 – висотний коректор; 5 – датчик-розподільник запалювання; 6 – датчик температури рідини; 7 – термореле (знаходяться в пристрої вхідних параметрів I); 8 – електронний блок керування; 9 – блок-реле; 10 – насос палива; 11 – акумуляторна батарея; 12 – вимикач запалювання; (знаходяться в пристрої керування II); III – пристрій вихідних параметрів (13 – робочі форсунки; 14 – клапан додаткового повітря; 15 пускова форсунка)

3. Реле: електромагнітні, нейтральні, поляризовані, електронні, геркони, електронні ключі. Нейтральні електромагнітні реле, що використовують у колах змінного та постійного струму, поляризовані електромагнітні реле, що застосовують в основному в колах постійного струму систем автоматики, геркони розглянуті раніше, як керуючі елементи автоматичних систем. Тут розглянемо лише формулу визначення електромагнітної сили, що діє на рухому частину реле, змінюючи стан контактної системи його, залежно від магнітного потоку Φ , кількості витків котушки ω , струму I , зазору δ , перерізу осердя S .

$$F = \frac{(0,4\pi I\omega)^2 S}{8\pi} \frac{1}{\delta^2}, \text{ Н.} \quad (290)$$

Електронні реле складаються з електромагнітного реле та електронної лампи чи транзистора, тиристора та ін., що відіграють роль підсилювача сигналів керування. (рис. 216).

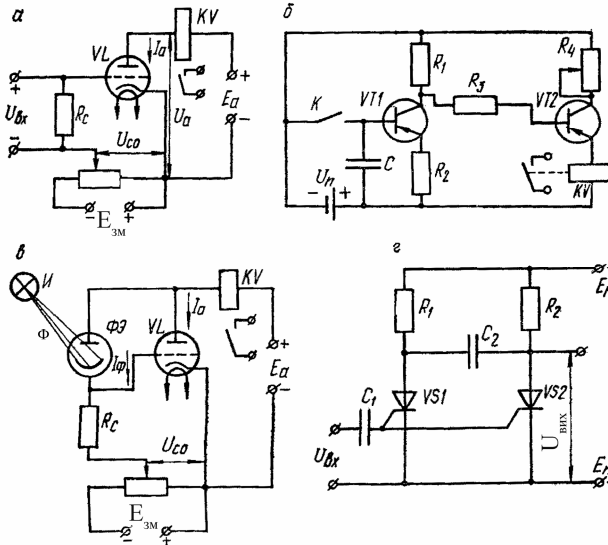


Рис.216. Електронні реле:

а – електронне реле на вакуумному тріоді; б – транзисторне електронне реле; в – фотоелектронне реле на вакуумному тріоді; г – тиристорне електронне реле

Вони мають високу чутливість, але інертні, неекономічні, з невеликим строком роботи.

На схемі (рис.216) при відсутності вхідного керуючого сигналу лампа закрита від'ємною напругою зміщення на сітці, струм анодний I_a малий, реле KV не спрацьовує. При дії вхідного сигналу $U_{вх}$ лампа VL відкривається, I_a зростає, реле KV спрацьовує, замикаючи контакти.

На схемі (рис.216) реле електромагнітне KV вмикається в коло емітера транзистора VT2. Під час замикання ключа К конденсатор С заряджається до напруги U_n , відкриваючи транзистори VT1, а потім і VT2. Струм емітера I_e транзистора VT2 стає більшим $I_{спрац}$ реле, і його контакти замикаються. При розмиканні ключа К конденсатор С розряджається, струми I_b , I_k , I_c транзисторів різко зменшуються, вони

закриваються і реле KV повертається у вихідне положення. Резистором R_4 підбирають струм спрацювання реле.

На схемі (рис.216, в) наведено фотоелектронне реле, що складається з електромагнітного реле KV, фотоелемента ФЕ, що перетворює світлову енергію в електричну, та електронної лампи VL, як елемента підсилювального. Отже, під час освітлення фотоелемента з'являється фотострум I_f , потенціал сітки стає більш позитивним, лампа VL відкривається, реле спрацює, замикаючи свої контакти в колі керування. Якщо не має світла, фотострум зменшується і від'ємним потенціалом зміщення U_c , лампа закривається, контакти реле KV розмикаються, $I_a < I_{\text{спрац.}}$.

На рис. 217, з наведено схему безконтактного тиристорного реле, як напівпровідниковий замикаючий пристрій з двома сталими станами (тиристри по черзі закриваються і відкриваються: якщо VS2 – відкритий, то VS1 – закритий і навпаки).

Отже, при $R_2 > R_1$, потенціал точки 2 більше потенціалу точки 1, за наявності $U_{\text{вх}}$ на керуючій електроді VS2 відкривається, а VS1 – закривається, що призводить до скачкоподібного зменшення потенціалу ϕ_2 від потенціалу ϕ_1 , та заряду конденсатора C_2 . Під час подачі другого додатного імпульсу тиристор VS1 відкривається, а VS2 – закривається і конденсатор C_2 перезаряджається. При подачі третього додатного імпульсу тиристри перекидаються до стану VS1 – закривається, VS2 – відкривається, кожний вхідний імпульс перемикає схему із одного стану в інший.

Електронні ключі перетворюють постійний струм джерела енергії в електричні імпульси певної форми, тривалості тощо.

У ролі електронного ключа як правило використовують транзистори, електронні лампи, тиристри, діоди напівпровідникові тощо. Як пасивні елементи застосовують резистори, ємності. Електронний ключ характеризується опором R_z замикаючого кола, $R_{\text{від}}$ – опором відкритого ключа, ємністю C ключа, передаточною характеристикою.

На рис. 217 подано схему послідовного діодного ключа з нульовим рівнем вмикання та його передаточна характеристика $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$. При вхідному додатньому сигналі $U_{\text{вх}}$ – ключ замкнутий, а при сигналі на вході від'ємної полярності – ключ розімкнений.

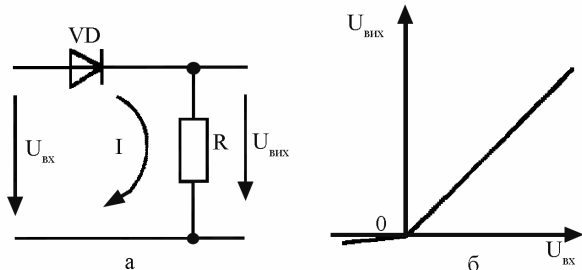


Рис. 217. Схема діодних ключів:
а – схема послідовного діодного ключа;
б – передаточна характеристика ключа

При замиканні ключа

$$I_3 = \frac{U_{ВХ}}{R_{пр} + R_H}, \text{ А}; \quad U_{ВИХ.3} = U_{ВХ} \frac{R_H}{R_H + R_{пр}} = I_3 R_H, \text{ В.} \quad (291)$$

При розімкненому ключі

$$I_p = \frac{U_{ВИХ}}{R_{зв} + R_H}, \text{ А}; \quad U_{ВИХ.p} = U_{ВХ} \frac{R_H}{R_H + R_{зв}} = I_p R_H, \text{ В} \quad (292)$$

де $R_{пр}$ – прямий опір діода; $R_{зв}$ – зворотній опір діода $R_{зв} \gg R_{пр}$.

Передаточна характеристика $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ розміщена в першому квадранті і починається з нуля, тому і ключі з такою характеристикою звуть ключами з нульовим рівнем спрацювання.

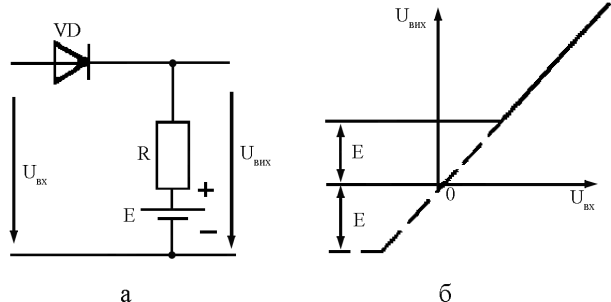


Рис. 218. Схема послідовного діодного ключа:
а – схема послідовного діодного ключа з ненульовим рівнем спрацювання;
б – передаточна характеристика ключа

На рис. 218 наведено схему послідовного діодного ключа з ненульовим рівнем спрацювання. Відрізняється тим, що на виході ключа сигнал з'являється тільки тоді, коли $U_{вх}$ має додатню полярність і амплітуду, більшу за $E_{см}$. Передаточна функція починається не з початку координат (пунктирна лінія характеристики буде при від'ємному зміщенні).

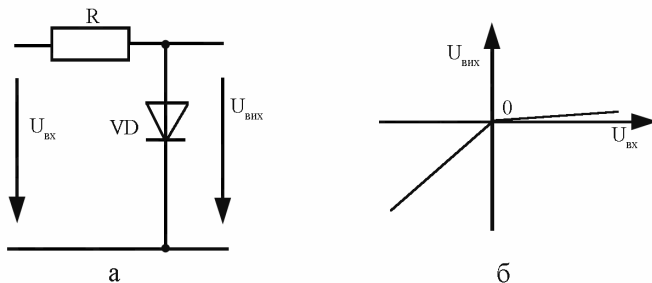


Рис. 219. Схема паралельного діодного ключа:

а – схема паралельного діодного ключа з нульовим рівнем спрацювання; б – передаточна характеристика ключа

На рис. 219. показано схему паралельного діодного ключа (опір R_n і діод VD поміняли місцями). Замкненому положенню ключа відповідає $U_{вх}$ додатної полярності, а $U_{вих}=0$. Розімкненому положенню ключа відповідає $U_{вх}$ від'ємної полярності, коли $U_{вих}=U_{вх}$. Передаточна характеристика $U_{вих}=f(U_{вх})$ розміщена в третьому квадранті і починається з початку координат.

Діодні ключі застосовують у схемах релаксаційних генераторів, обмежувачів амплітуди сигналів, порогових пристроїв, як пристроїв амплітудної селекції (виділення сигналів з амплітудою більше чи менше сигналів певного рівня чи імпульсів з даною амплітудою). Недоліки діодних ключів – вони не підсилюють вхідних сигналів за потужністю, наявність безпосереднього зв'язку вхідних і вихідних кіл.

Ці недоліки відсутні в транзисторних ключах. При цьому застосовують як біполярний, так і економічні польові транзистори, що вмикаються за трьома відомими схемами.

Розглянемо роботу поширеного транзисторного ключа ввімкненого по схемі з спільним емітером (ЗЕ) (рис. 220). Робочий режим транзистора задається напругою зміщення $E_{зм}=E_б$, прикриваючи транзистор VT . Опір $R_б$ обмежує струм бази $I_б$. Опір $R_к$ ввімкнений у коло колектора.

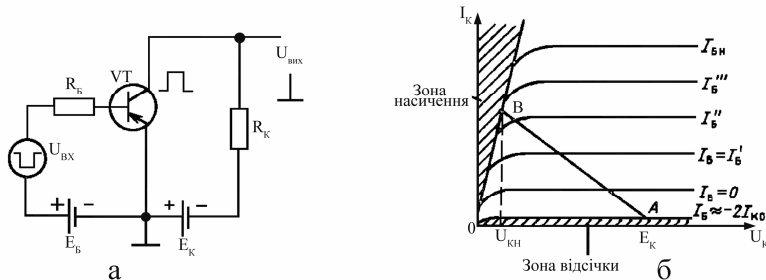


Рис. 220. Робота транзисторного ключа:
а – електрична схема транзисторного ключа на біполярному транзисторі; б – вихідна характеристика транзисторного ключа

При $U_{\text{вх}}$ від'ємної полярності рівним 0 транзистор закритий напругою зміщення $U_{\text{бє}}=E_{\text{зм}}$. Струм колектора $I_{\text{к}}$ та $I_{\text{б}}$ невеликий $I_{\text{к}}=2I_{\text{к0}}$, а $I_{\text{б}}=-2I_{\text{к0}}$. Цей режим називають режимом відсічки.

Під час подачі на вхід ключа $U_{\text{вх}}$ струм бази, колектора зростають, а напруга на колекторі $U_{\text{к}}=U_{\text{насич}}$ майже не змінюється. Цей режим транзистора називають режимом насичення. Транзистор працює на ділянці АВ в активному режимі при значному $I_{\text{к}}$. Якість роботи ключа в замкненому стані визначають за остаточною напругою на колекторі відкритого транзистора (чим вона менша, тим кращий ключ) та напругою на базі відкритого транзистора (вона в межах $0,1 - 0,2\text{В}$).

Електромагнітні пускачі, контактори служать для дистанційного керування (пуску, зупинки) трифазних споживачів, джерел енергії. Пускачі, крім того, за наявності теплових реле в комплекті з ними захищають від перевантажень.

Основною частиною електромагнітних пускачів є електромагнітні контактори змінного струму. Взагалі, до складу електромагнітного пускача може входити один або два контактори, теплові реле, кнопчні пости, сигнальні лампи та інші елементи, укладені в металеву, пластмасову оболонку.

Випускають пускачі без оболонок, без теплових реле, кнопок, що мають лише один контактор.

Ступені захисту пускачів, контакторів: IP00 (відкрите виконання), IP30, IP40 (захищене), IP54 (пилоткрапле захисне); кліматичне виконання У4, У3, У2.

Останнім часом застосовують пускачі серії ПМЛ з триполюсним тепловим реле серії РТЛ для захисту від перевантажень і струмів, що виникають під час обриву однієї з фаз. Робоча температура

пускатів $+45^{\circ}\dots-40^{\circ}\text{C}$, робота над рівнем моря – до 2500 м, групи умов експлуатації М4, М7, М8, вібрація – до 8–16 Гц, строк служби 6–10 років при категорії застосування АС-3. Пускачі серії ПМЛ випускають сім величин на струми до 200 А при напрузі 380 В. Подібні дані пускатів серії ПМА, ПМЕ. Електромагнітні контактори призначені для роботи при напрузі до 1000 В змінного струму частотою 50 Гц і до 1200 В постійного струму, серії КТ6000БС, КТ7000БС, КТ7000Б на струм до 630 А, категорія застосування – АС-3, АС-4, режим роботи – тривалий. Найчастіше керуючим елементом у схемах автоматизації є реле різної конструкції. Реле – це автоматичний прилад, який замикає або розмикає електричні кола залежно від певних факторів, на які воно повинно реагувати.

За видом фізичних факторів реле класифікують так:

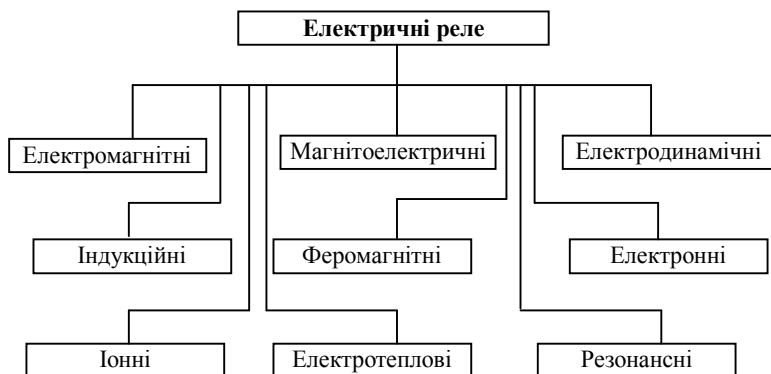


Рис. 221. Класифікація електричних реле

Розглянемо докладніше електромагнітні реле, які найбільш поширені. В електромагнітному реле (рис. 222) чутливим органом є електромагніт, в якому сила притягування рухомого якоря до осердя пропорційна струмові в котушці. Пружина призначена для утримання якоря в розімкненому положенні. Реле спрацьовує тоді, коли дія електромагніту буде сильніша, ніж протидія пружини.

За таким принципом побудовані реле напруги й струму. У реле струму контрольований струм проходить через послідовну котушку реле. Ці котушки мають невелику кількість витків з товстого проводу. Реле напруги вмикання паралельно тій ділянці електричної схеми, на якій потрібно контролювати напругу. Котушка реле напруги має велику кількість витків з тонкого проводу.

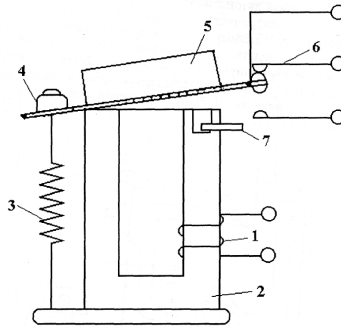


Рис. 222. Схема будови електромагнітного реле:
 1 – котушка; 2 – осердя; 3 – відтягувальна пружина; 4 – гайка регулювання; 5 – яр; 6 – контакти; 7 – короткозамкнений виток.

Магнітна система реле змінного струму відрізняється від магнітної системи реле постійного струму. Реле постійного струму мають магнітну систему з суцільного заліза. У реле змінного струму магнітна система складена з окремих ізольованих одна від одної пластин, виготовлених із спеціальної електротехнічної сталі. Це робиться для того, щоб у магнітній системі зменшити втрати потужності, які спричиняються перемагнічуванням та вихровими струмами. Другою особливістю магнітної системи реле змінного струму є наявність короткозамкненого витка, завдяки якому усувається вібрація рухомого ярка і контактів.

При спрацюванні реле одні контакти замикаються, а інші розмикаються, що веде до замикання або розмикання відповідних електричних кіл. Крім реле струму і реле напруги широко застосовують проміжні реле, призначені для розмноження одного сигналу, що подається на котушку реле, на кілька електричних кіл, а також для збільшення потужності сигналу.

Електромагнітні реле називаються нейтральними, оскільки вони реагують тільки на значення вхідного сигналу й нечутливі до полярності цього сигналу.

Але в системах автоматики іноді потрібно застосувати реле, що реагують на полярність електричного сигналу. У цих випадках використовують поляризовані реле. У магнітній системі поляризованих реле поряд із звичайним магнітопроводом додатково встановлюють постійний магніт (рис.223), тому рухома частина переміщується в той

або інший бік під загальною дією двох магнітних потоків: від котушок реле реагують як на значення вхідного сигналу, так і на його полярність.

Найбільш поширені три типи поляризованих реле: РП4(РП4М), РП5 і РП7. Вони відрізняються одне від одного характером регулювання контактних систем (РП4 і РП4М) – двопозиційне реле, однаково реагує на замикання до правого й лівого контактів; РП5 – трипозиційне поляризоване реле; РП7 – двопозиційне реле з перевагою замикання до першого контакту).

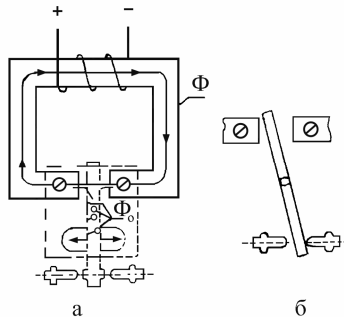


Рис. 223. Поляризоване реле:

а – схема магнітних потоків; б – контакти двопозиційного реле

Поляризовані реле РП4 і РП5М мають 15 модифікацій, в яких різна кількість (від 2 до 7), різний опір обмоток (від десятків омів до кількох кілоомів), різний струм спрацювання (від сотих часток до кількох одиниць міліампера). Трипозиційне реле РП-5 має 24 модифікації з кількох обмоток від 1 до 7 опором від десятків омів до кількох кілоомів і струмом спрацювання від сотих часток міліампера до 20 міліамперів.

Реле РП7 має 14 модифікацій з кількістю обмоток від 1 до 7. Опір обмоток становить від одиниць омів до 7 кілоомів. Струм спрацювання – від десятих часток до кількох міліамперів.

Контактори використовують для частого дистанційного та автоматичного керування (включення і відключення) електричними колами до 1000 В. На рис.224 подано схему контактора однополюсного. При подачі струму в котушку контактора якір 8 перетягується до осердя електромагніта 2 і замикає контакт 1. Струм подають натисканням спеціальної кнопки або за допомогою контактів реле автоматики. Струм комутуючого кола підводиться до нерухомого контакту 1, а потім через замкнені контакти і пружинні струмопроводи 4 іде до

споживача. Контакти забезпечують дугогасними пристроями. При припиненні струму контактор розмикає контакти під дією пружини і ваги рухомих частин.

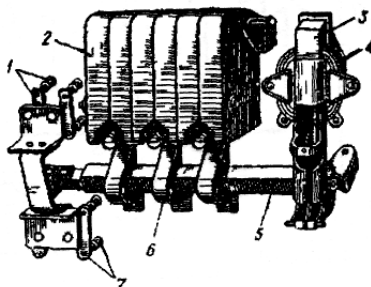


Рис. 224. Контактор змінного струму:

1 і 7 – допоміжні контакти; 2 – дугогасильна камера; 3 – осердя електромагніту; 4 – котушка; 5 – валик; 6 – гнучкий струмопровід.

Магнітний пускач також використовують для дистанційного і автоматичного вмикання і відключення електричних кіл потужністю до 75 кВт.

Він складається з триполюсного контактора 2, двох теплових реле 4 і блок-контактів 1, вмонтованих у загальний корпус. Для керування магнітний пускач МП доповнюють кнопковою станцією, яка складена з кнопки пуску КнП. Електромагніт 3 вмикає силові контакти 5, які закріплені на осі, і блок-контакти 1, шунтуючи пускову кнопку. Завдяки цьому електромагніт замикається ввімкненим при відпусканні кнопки КнП. Дистанційне відключення МП виконують кнопкою КнС, яка розриває коло електромагніту 3.

При струмових перевантаженнях нагріваються елементи 5 (біметалеві пластинки теплових реле 4), які розмиканням своїх контактів відключають утримуючий електромагніт 3 і пускач відключається.

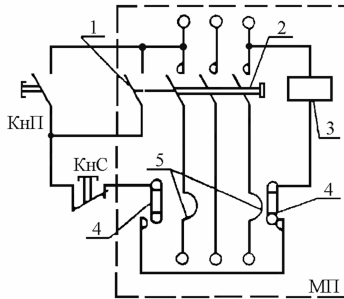


Рис.225. Магнітний пускач:

1 – блок-контакти, 2 – триполюсний контактор,
3 – електромагніт, 4 – теплове реле, 5 – силові контакти

Контрольні запитання

1. Навести приклади застосування виконавчих елементів автоматики, їх типи.
2. Які основні параметри виконуючих пристроїв?
3. Який принцип дії (коротка характеристика) двигунів одно- і трифазних як виконавчих елементів?
4. Пояснити будову та роботу електромагнітів.
5. Пояснити будову та роботу електромагнітних муфт, їх типи.
6. Будова, робота, призначення контакторів та електромагнітних пускачів.
7. Пояснити схему вмикання електричних виконавчих елементів – однофазних, трифазних двигунів та електромагнітів.

2.12. ПІДСИЛЮВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

1. Загальні відомості. Класифікація і параметри підсилювачів.
2. Напівпровідникові і магнітні підсилювачі.

1. Загальні відомості. Класифікація і параметри підсилювачів. Вихідні сигнали датчиків, елементів порівняння, як правило, слабкі і не можуть безпосередньо використовуватися для приведення в дію різних механізмів автоматики. Тому в сучасних системах автоматики широко застосовують підсилювачі, що підсилюють потужність сигналу та можливого його перетворення у вид, зручніший для роботи системи.



Рис. 226. Структурна схема підсилювача низької частоти

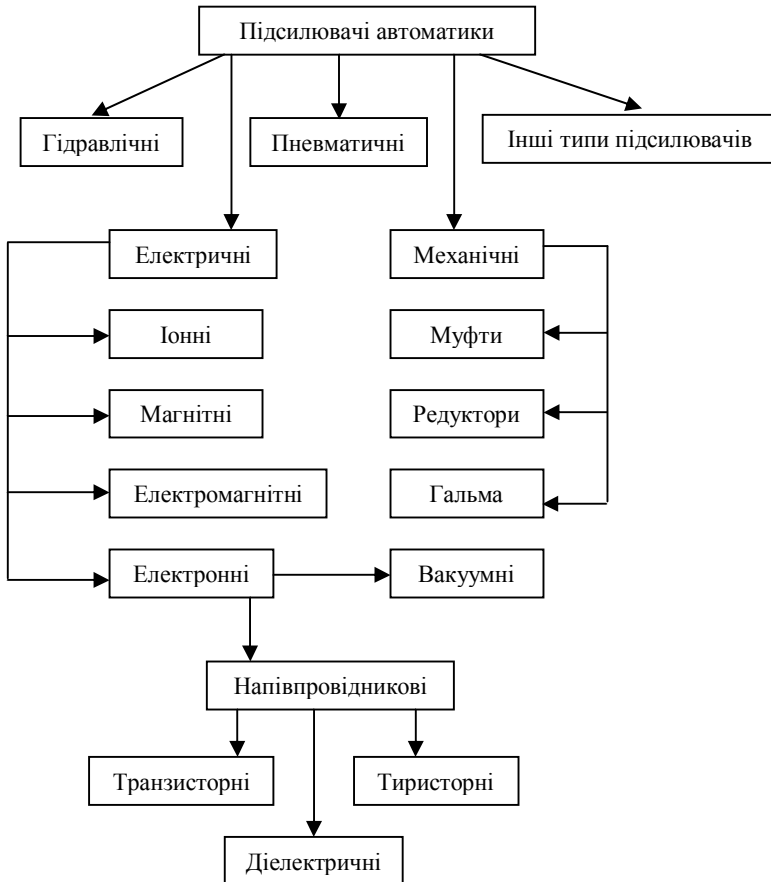


Рис. 227. Класифікація підсилювачів автоматики

Підсилювачем називають пристрій, призначений для збільшення потужності сигналу за рахунок енергії джерела живлення, при цьому вихідна підсилена величина є функцією вхідного сигналу і має з ним однакову фізичну природу. За видом використаної енергії підсилювачі діляться на електричні, гідравлічні, пневматичні, механічні тощо.

2. Напівпровідникові і магнітні підсилювачі. Напівпровідникові транзисторні підсилювачі мають невеликі габарити, масу, економічні, значний строк роботи, високий к.к.д., але їх параметри змінюються під час зміни температури, що є їх недоліком.

Тиристорні підсилювачі застосовують при значно більших струмах та напругах. Вони також мають невеликі габарити, масу, високий ККД, надійні, але чутливі до перевантажень по струму.

Магнітні підсилювачі не мають рухомих частин, нечутливі до вібрацій, якості електроенергії, їх потужність сягає десятків кіловат. До недоліків належать великі габарити, інерційність, вартість.

Діелектричні підсилювачі застосовують як підсилювачі потужності (на базі варікапів), але їх параметри залежать від вологості, температури.

Гідравлічні і пневматичні підсилювачі служать для підсилення вхідних величин за потужністю, тиском або використовуються як виконавчі елементи (серводвигуни). Їх схеми аналогічні і розрізняються за видом робочого тіла (рідина чи повітря) та конструктивно (обробкою поверхні, герметизацією). Дані підсилювачі надійні, мають велику потужність, невелику інертність.

Механічні підсилювачі ділять на муфти, редуктори, гальма, які являють собою механічні трансформатори для перетворення зусиль, частоти обертання та крутного моменту.

Підсилювальний елемент разом з пасивними елементами (резисторами, конденсаторами, котушками індуктивності) називають підсилювальним каскадом. За формою характеристик, як залежність між вихідною і вхідною величинами, розрізняють підсилювачі з лінійними і нелінійними характеристиками.

Показники підсилювача – це параметри і характеристики, за якими оцінюють якість його як елемента системи автоматики.

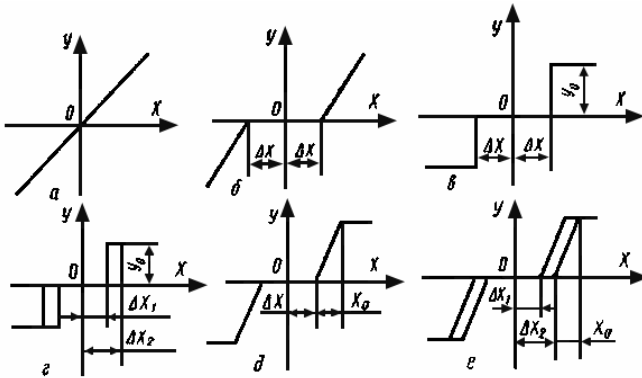


Рис.228. Статичні характеристики підсилювачів:
a – лінійного; *б–е* – нелінійних

Розглянемо основні з них.

Коефіцієнт підсилення – розрізняють за струмом, напругою, потужністю. Для усталеного режиму відповідно рівні:

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}}; \quad K_u = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}; \quad K_P = \frac{\Delta P_{\text{вих}}}{\Delta P_{\text{вх}}}. \quad (293)$$

Вихідна потужність підсилювача.

$P_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}^2}{R_{\text{н}}}$ – це корисна потужність, при якій спотворення не перевищують допустимих величин.

Вхідний і вихідний опір ($R_{\text{вх}}$ і $R_{\text{вих}}$). $R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$, Ом;

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{вих}}}, \text{ Ом}. \quad (294)$$

Вихідний опір визначають між вихідними зажимами підсилювача при вимкненому опорі навантаження $R_{\text{н}}$. Коефіцієнт корисної дії визначається за формулою

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_0} \times 100\%, \quad (295)$$

де P_0 – загальна потужність джерел живлення, Вт.

Номінальна вхідна напруга (чутливість) – це напруга на вході підсилювача, при якій на виході забезпечується задана потужність.

Чим менша величина $U_{вх}$, що визначає задану потужність, тим чутливіший підсилювач.

Діапазон підсилювальних частот (полоса пропускання підсилювача) – сфера частот, коли коефіцієнт підсилення змінюється не більше, ніж допускається за умовами роботи.

Спотворення в підсилювачах – нелінійні, частотні, фазові. При цьому відповідно змінюється форма підсилювальних коливань, величина коефіцієнта підсилення при зміні частоти та з'являється зсув фаз між $U_{вх}$ і $U_{вих}$. Спотворення в підсилювачах – явища негативні і їх вплив, якщо можна, зменшують.

Електронні підсилювачі широко застосовують у системах автоматики для попереднього підсилення слабких сигналів, що виробляють датчики до потужності, що не перевищує 100 Вт. Вони можуть бути напівпровідникові, постійного, змінного струму, одно- і багатокаскадні.

Напівпровідникові підсилювачі характеризуються невеликою потужністю споживання, є стійкими та надійними, економічні. За способом вмикання напівпровідникових підсилювачів розрізняють три схеми вмикання (рис.229).

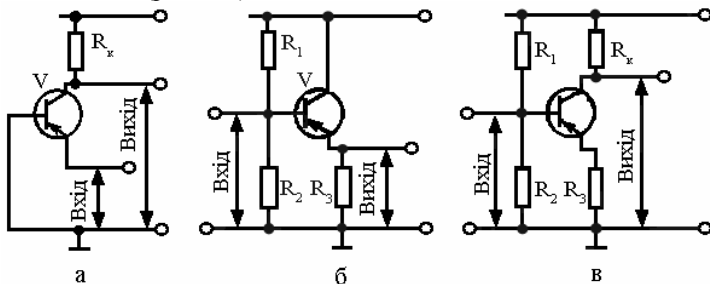


Рис. 229. Схеми підсилювачів:

в, г – відповідно підсилювачі транзисторні однокаскадні з загальною базою; із спільним колектором; із спільним емітером

Схема із загальною базою використовується як вхідний каскад по відношенню до датчика з низьким вхідним опором. Вихідна напруга знаходиться у фазі з вихідною. Коефіцієнт підсилення за струмом менше одиниці, а за напругою – значно більше одиниці.

Схеми із спільним колектором застосовують як перший каскад підсилення для узгодження вмикання з датчиками, що мають високоомний вихід, а також як вихідний каскад під час вмикання до

низькоомного навантаження. Коефіцієнт підсилення їх за струмом до 10^3 , за напругою – менше одиниці.

Поширеніші підсилювачі із спільним емітером, тому що забезпечують високий коефіцієнт підсилення за потужністю, струмом до 10^3 при порівняно великому входньому опорі. Вихідна і вхідна напруга знаходяться у протифазі.

Розглянемо дві прості схеми попередніх резистивних підсилювачів: а) схема з фіксованим струмом бази; б) схема з фіксованою напругою зміщення на базі.

У підсилювачі з фіксованим струмом бази вхідний сигнал надходить на базу, змінюючи її потенціал відносно заземленого емітера, а отже струм I_B , I_K і напруги на колекторі U_K , та на резисторі R_K .

Завжди $E_K = U_K + I_K R_K$. В. Процес підсилення запишемо так:

$$U_{m,вх} \rightarrow I_{Bm} \rightarrow I_{Km} R_K \rightarrow (U_{Kcm} = E_K - I_{Km} R_K) = U_{mвх} \gg U_{mвх}$$

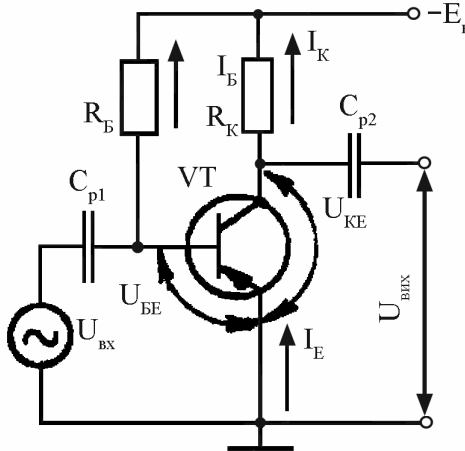


Рис. 230. Схема резистивного підсилювача однокаскадного із спільним емітером

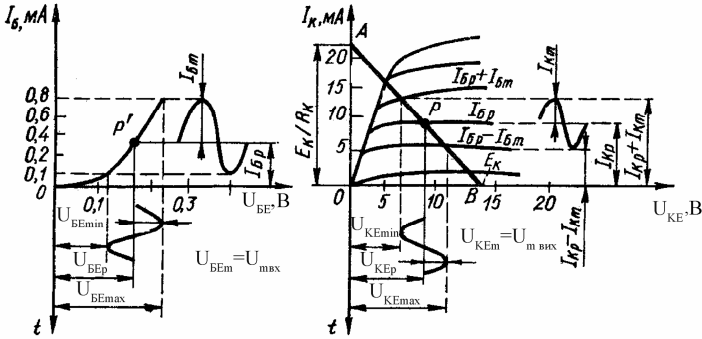


Рис. 231. Графічне пояснення процесу підсилення вхідного сигналу в схемі зі спільним емітером

У схемі підсилювача конденсатор C_{p1} не пропускає постійну складову вхідного сигналу на базу транзистора VT , а C_{p2} – не пропускає постійної складової на вихід підсилювача. Резистор R_6 забезпечує вибір вихідної робочої точки на характеристиці транзистора, що, в свою чергу, визначає режим роботи каскада за постійним струмом. Величина резистора R_6 визначає струм зміщення в колі бази I_{6p} і роботу підсилювача в точці P (середина прямої навантаження AB).

$$\text{При цьому } R_6 = \frac{E_K - U_{6ep}}{I_{6p}}, \text{ Ом,} \quad (296)$$

де I_{6p} , U_{6ep} – знаходять за вхідними параметрами транзистора (точка P^1); $R_6 \approx \beta E_K / I_{kp}$, Ом;

$$\beta - \text{коєфіцієнт підсилення за струмом } \beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6};$$

I_{kp} – постійна складова струму колектора в точці P .

Цей каскад стійко працює при малих коливаннях температури, але при зміні транзистора режим роботи підсилювача змінюється.

Схема резистивного підсилювача з фіксованою напругою зміщення на базі відрізняється від попередньої схеми підсилювача вмиканням замість R_6 подільника напруги $R_6^1 - R_6^{11}$ до зажимів E_K .

$$\text{При цьому } R_6^1 = \frac{E_K - U_{6p}}{I_D + I_{6p}}, \text{ Ом; } R_6^{11} = \frac{U_{6p}}{I_D}, \text{ Ом.} \quad (297)$$

Струм подільника $I_D \approx (2 \dots 5) I_{6p}$, (мА).

Для збільшення $R_{вх}$ підсилювача $R_{б}^I$ і $R_{б}^{II}$ повинні бути достатньої величини.

Принцип роботи схеми аналогічний попередній і полягає в підсилювальних властивостях транзистора як активного елемента.

Для стабілізації роботи підсилювача при коливаннях температури застосовують кола емітерної стабілізації R_e-C_e (рис. 233, в).

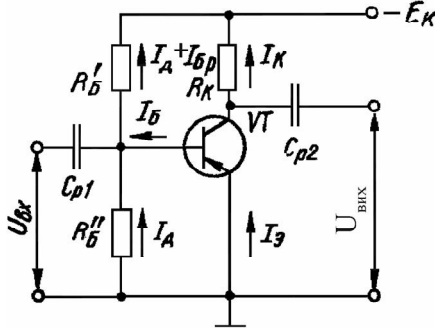


Рис. 232. Схема резистивного однокаскадного підсилювача з фіксованою напругою зміщення на базі

Назустріч фіксованій напрузі зміщення, що виникає на резисторі $R_{б}^{II}$, ввімкнена напруга резистора R_e ; так що з ростом I_k при збільшенні температури зростає $I_e = I_k + I_b$, а значить напруга на резисторі R_e напруга $U_{еб}$ падає, зменшується струм I_b і відповідно I_k .

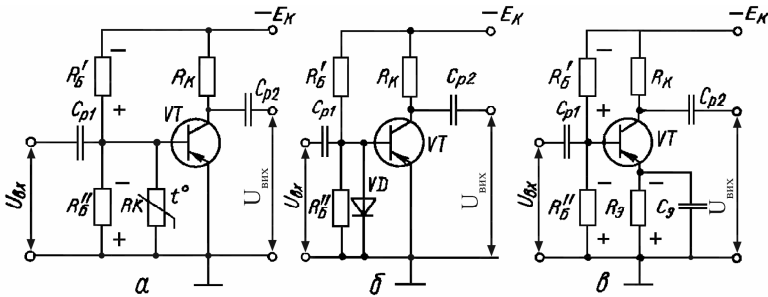


Рис.233. Схеми термостабілізації режиму транзисторних каскадів:
а – з терморезистором; б – з напівпровідниковим діодом;
в – з ланкою в колі емітера $R_e C_e$

При зменшенні температури транзистора зменшується I_k , напруга на резисторі R_e , зростає $U_{eб}$, струм I_b та I_k вернеться до попереднього значення. Через конденсатор C_e відводиться змінна складова I_c від резистора R_e . Схему термостабілізації наведено на рис. 233.

Багатокаскадне (послідовне) з'єднання підсилювачів використовують тоді, коли окремий однокаскадний підсилювач не забезпечує заданих параметрів (коефіцієнта підсилення за напругою, потужністю тощо).

Таблиця 8

Структурна схема багатокаскадного підсилювача

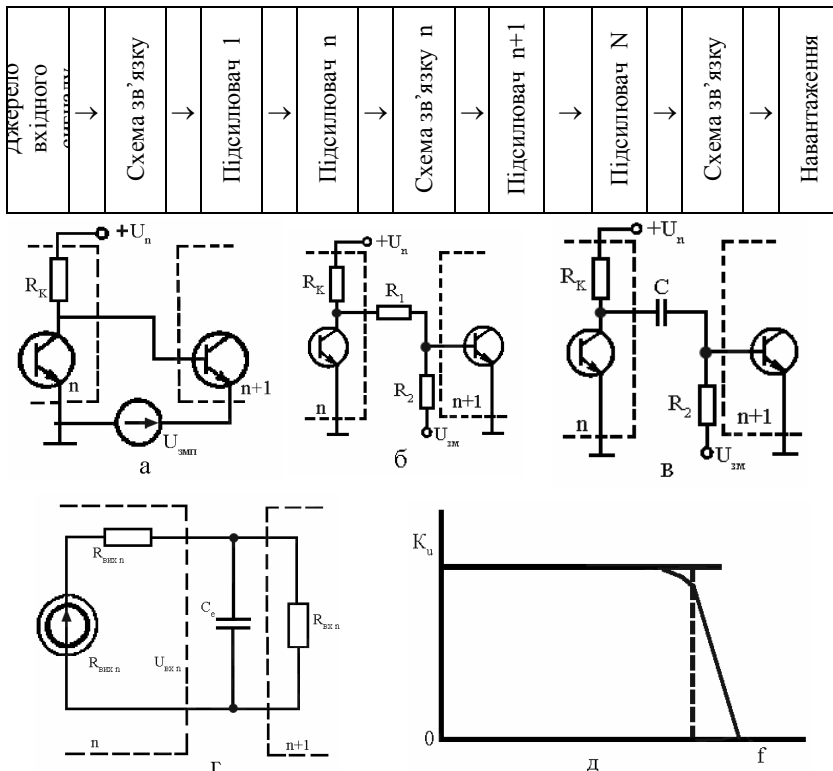


Рис. 234. Види міжкаскадних зв'язків між підсилювачами:
 а – безпосередній зв'язок (гальванічний); б – реостатний; в – ємнісний зв'язок; г – схема заміщення підсилювача з гальванічним зв'язком; е – частотна характеристика підсилювача

Під час каскадного з'єднання застосовують різні схеми зв'язку, що служать як для з'єднання окремих підсилювачів між собою, так і для зв'язку вхідного сигналу з входом підсилювача та навантаження з його виходом. Основне призначення схеми зв'язку – узгодження напруг, відповідних режимам роботи попереднього і наступного підсилювачів за збереження частотних характеристик та високого коефіцієнта передачі змінної складової напруги схеми зв'язку $K_{ізв}$.

Різні види зв'язку при каскадному з'єднанні підсилювачів, умови узгодження режимів роботи по постійному струму та коефіцієнт $K_{ізв}$ наведено в рис. 234.

Електричні підсилювачі однокатні і двокатні. Ці підсилювачі, як правило, виконують функції підсилювача потужності. Величина максимальної неспотвореної потужності, к.к.д. підсилювача потужності залежить від типу потужних транзисторів (польових чи біполярних), режиму роботи, схеми каскада.

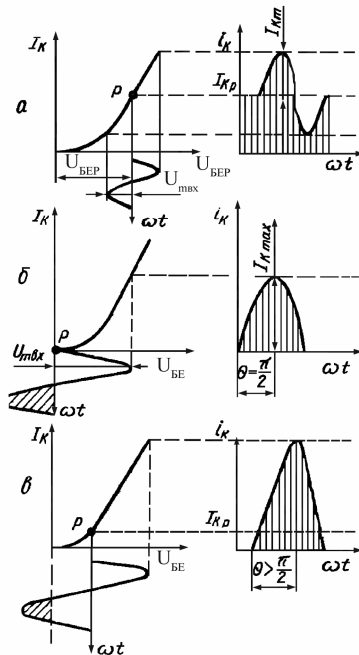


Рис. 235. Графіки що пояснюють роботу підсилювача в режимах: а – класу А; б – класу В; в – класу АВ

Залежно від вибору робочої точки на прохідні динамічні характеристики транзистора [$I_k=f(U_{cb})$, тобто $I_{вих}=f(U_{вх})$] розрізняють три основних режими роботи підсилювача А; В; АВ (рис. 235).

У режимі А на базу транзистора подається така напруга зміщення, щоб робоча точка Р, яка визначає вихідний стан схеми при відсутності вхідного сигналу, знаходилась посередині прямолінійної ділянки характеристики. За абсолютною величиною напруга зміщення $U_{бер}$ більше амплітуди вхідного сигналу $U_{т.вх.}$, і відповідно струми $I_{кр}>I_{кт}$. При цьому забезпечується мінімальні спотворення вхідного сигналу, але режим цей мало економічний (к.к.д. рівний 20–30%), придатний для роботи малопотужних підсилювачів.

У режимі В напруга зміщення і робоча точка Р вибираються так, щоб при відсутності вхідного сигналу струм спокою був рівний нулю, а при подачі на вхід сигналу струм вихідний підсилений протікає тільки протягом півперіоду. При цьому к.к.д. сягає 70%, але в цьому режимі має місце значне спотворення сигналу, тому його використовують у потужних підсилювачах.

Режим АВ є проміжним між А і В, що видно з графіка.

Розглянемо типову схему однотактного вихідного каскаду підсилювача із спільним емітером. Елементи схеми C_p , R_b^I , R_b^{II} , C_e , R_e виконують уже раніше описані функції.

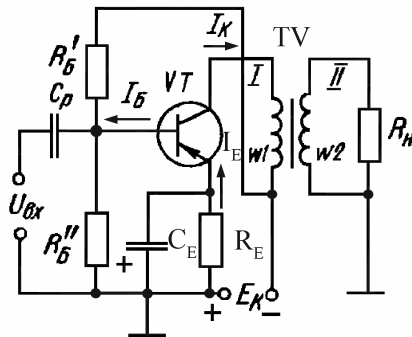


Рис. 236. Однотактний вихідний каскад потужності транзисторного підсилювача

Вихідний трансформатор узгоджує опір навантаження R_n з вихідним опором транзистора VT. Як видно з графіка роботи каскаду, робоча точка Р знаходиться на середині прямої АВ, отже каскад працює в режимі А з малими спотвореннями при потужності

$$P_{\text{вих}} = \eta_{\text{тр}} \frac{I_{\text{КТ}} U_{\text{КТ}}}{2}, \text{ Вт}, \quad (298)$$

де $\eta_{\text{тр}}$ – к.к.д. трансформатора (0,7...0,9);

$I_{\text{КТ}}$, $U_{\text{КТ}}$ – відповідно амплітудні значення струму, напруги колектора;

$$I_{\text{КТ}} = \frac{I_{\text{к.мах.}} - I_{\text{к.мін.}}}{2}, \text{ А}; \quad U_{\text{КТ}} = \frac{U_{\text{к.мах.}} - U_{\text{к.мін.}}}{2}, \text{ В}. \quad (299)$$

За законом вхідного сигналу змінюється струм бази транзистора, отже струм колектора $I_{\text{КТ}}$ є первинним струмом трансформатора. Ці зміни потужності передаються електромагнітним шляхом в обмотку W_2 і в навантаження. Змінний струм бази, що відповідає вхідному сигналу проходить по колу: $+U_{\text{вх}} \rightarrow$ ланка $R_e - C_e \rightarrow E - B \rightarrow C_p \rightarrow -U_{\text{вх}}$. Струм колектора проходить по колу $+E_k \rightarrow$ ланка $R_e - C_e \rightarrow E - K \rightarrow W_1 \rightarrow -E_k$. Струм зміщення проходить $+E_k \rightarrow R_e \rightarrow E - B \rightarrow R_6 \rightarrow -E_k$.

Однотактні каскади підсилення потужності мають суттєві недоліки, основні з яких:

- неможливість застосовувати економічні режими АВ, В через великі спотворення;
- малий к.к.д.;
- значні спотворення нелінійні, частотні, викликані наявністю транзистора, а особливо трансформатора.

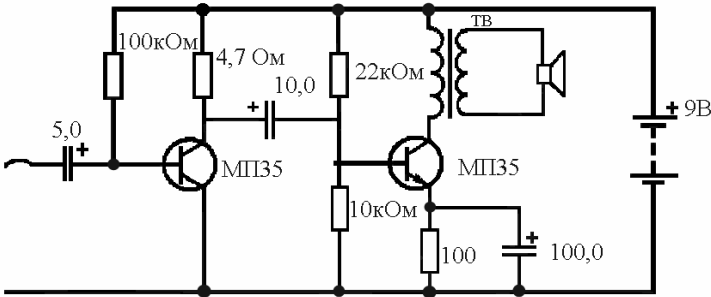


Рис. 237. Двотактний каскад підсилення потужності

Замість однотактних каскадів підсилення потужності застосовують двотактні каскади потужності (рис. 237), побудовані на двох транзисторах VT_1 і VT_2 , що працюють по черзі. Вхідний трансформатор TV_1 перетворює вхідний сигнал однофазний в двофазний $U_{\text{вх1}}$.

$U_{вх2}$, що знаходяться в протилежних фазах і подаються на бази транзисторів VT1, VT2.

Резистори R_6^I , R_6^{II} утворюють подільник напруги, що забезпечує потрібну напругу зміщення на базах транзисторів VT1, VT2. Джерело живлення E_k є спільним для обох плеч підсилювача. За відсутності вхідного сигналу $U_{вх}=0$ у колах транзисторів проходять постійні складові струмів бази і відповідно колекторів, що визначається положенням робочої точки на динамічній характеристиці транзисторів. За наявності вхідного сигналу, наприклад від'ємним потенціалом на базу VT1, а додатнім на базу VT2, працює транзистор VT1, підсилюючи вхідний сигнал. Змінний струм $I_{к1}$ колектора проходить по колу $+E_k \rightarrow VT1 \rightarrow TV2 \rightarrow -E_k$.

Магнітний потік, що наводиться в половині первинної обмотки трансформатора TV2 наводить в обмотці вторинні е.р.с. і через R_n протікає струм. Транзистор VT2 у цей такт (півперіод) закритий.

У другий півперіод відкривається VT2 і підсилюється аналогічно друга половина вхідного сигналу. Змінна складова струму колектора проходить по колу: $+E_k \rightarrow VT2 \rightarrow TV2 \rightarrow -E_k$.

Оскільки струми колекторів $I_{к1}$, $I_{к2}$ проходять по первинних обмотках трансформатора в різних напрямках, то в магнітопроводі його відсутнє постійне підмагнічування. Величина корисної потужності в навантаженні R_n визначається величиною змінного магнітного потоку магнітопроводу вихідного трансформатора, який пропорційний до різниці струмів колектора: $\Phi = A(I_{к1} - I_{к2}) = 2A I_{кт} \sin \omega t, Вб$.

Тобто, змінний магнітний потік пропорційний до подвоєння змінної складової струму $I_{кт}$, а потужність у навантаженні R_n рівна сумі потужностей транзисторів VT1, VT2.

Переваги двотактного каскаду: високий к.к.д. (режим В); відсутність постійного підмагнічення осердя; зниження спотворень підсиленого сигналу.

Недоліки каскаду: відносна складність схеми, використання складних трансформаторів, складність підбору однакових транзисторів.

Вимоги до зменшення маси, вартості призвели до створення безтрансформаторних двотактних підсилювачів потужності.

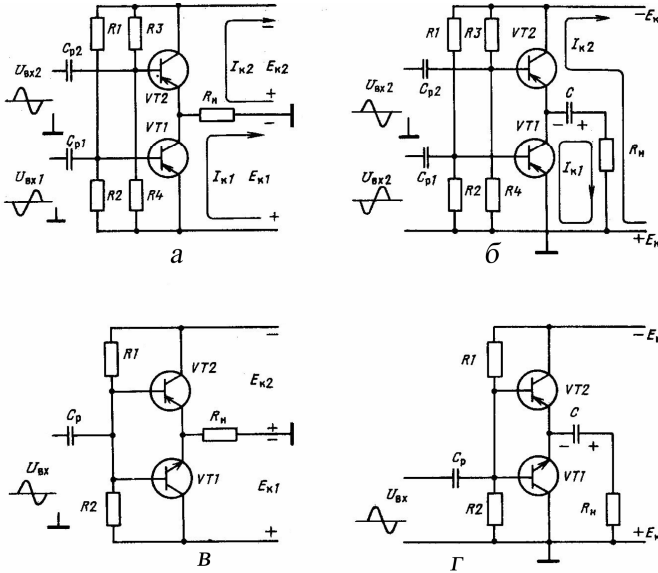


Рис. 238. Схеми безтрансформаторних двотактних підсилювачів потужності з живленням від двох джерел енергії (а, в) і одного джерела (б, г)

У першій схемі каскади на двох транзисторах живляться окремо від джерел $E_{к1}$, $E_{к2}$, на транзистори подаються сигнали в протифазі. Якщо відкритий VT2, то VT1 закритий і навпаки. Струми колекторів $I_{к1}$, $I_{к2}$ проходять в різні півперіоди, як показано на рисунку. Резистори R_1 - R_4 забезпечують режим роботи АВ.

У другій схемі різниця у вихідній частині каскаду – у схемі тільки одне джерело енергії $E_к$, при відкритому VT2 (від’ємний потенціал на його базі) струм $I_{к2}$ проходить по колу: $+E_к \rightarrow R_н \rightarrow C \rightarrow VT2 \rightarrow -E_к$.

У другий такт через відкритий транзистор VT1 проходить струм розряду конденсатора C по колу $- +C \rightarrow R_н \rightarrow VT1 \rightarrow -C$; транзистор VT1 вмикається з спільним емітером, а VT2 – із спільним колектором.

У третій схемі використовують два джерела живлення $E_{к1}$, $E_{к2}$, але транзистори різної провідності (VT1 \rightarrow p-n-p; VT2 \rightarrow p-n-p), тому відпадає необхідність в фазоінверсному каскаді (перетворює однофазний сигнал у двофазний $U_{вх1}$, $U_{вх2}$, зсунутими на 180°).

Транзистори працюють по черзі. В останній схемі транзистори різної провідності, але одне джерело живлення E_k (як у другій схемі), то транзистори працюють аналогічно, в режимі АВ.

Магнітні підсилювачі однокатні і двокатні. Магнітні підсилювачі належать до параметричних підсилювачів, принцип дії яких ґрунтується на використанні нелінійних характеристик кривої $B=f(H)$ намагнічування феромагнітних матеріалів ($\mu \gg 1$). Вони мають високий коефіцієнт підсилення по струму, потужності, практично не чутливі до вологи, вібрації, якості електроенергії, не мають рухомих частин, досить надійні, з високим к.к.д.

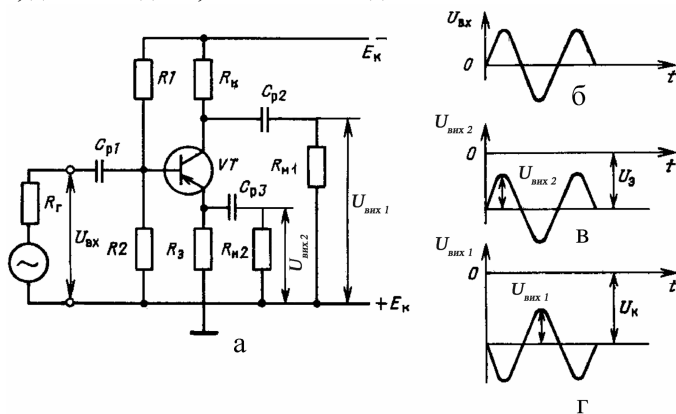


Рис. 239. Схема (а) і часові діаграми (б, в, з) транзисторного фазоінвертора

Одним із простих магнітних підсилювачів є дроселі насичення (рис. 240), що складаються з двох обмоток: керування ω_k , що живиться постійним струмом, та обмотки робочої ω_p , що вмикається послідовно з навантаженням Z_n до змінної напруги U .

Обмотки розміщені на одному осерді. Для схеми характерні співвідношення:

$$U = 4,44 f \omega_p B_{\max} S, \text{ В;}$$

$$\text{діюча напруга із закону повного струму } H \approx \frac{\omega_p i \approx}{l}, \text{ А/м;}$$

$$\text{магнітна проникність } \mu = B/H, \text{ Гн/м;}$$

$$\text{індуктивність } L = \mu_p^2 S \mu / l, \text{ Гн;}$$

$$\text{індуктивний опір } X_L = \omega L = 2\pi f L, \text{ Ом.}$$

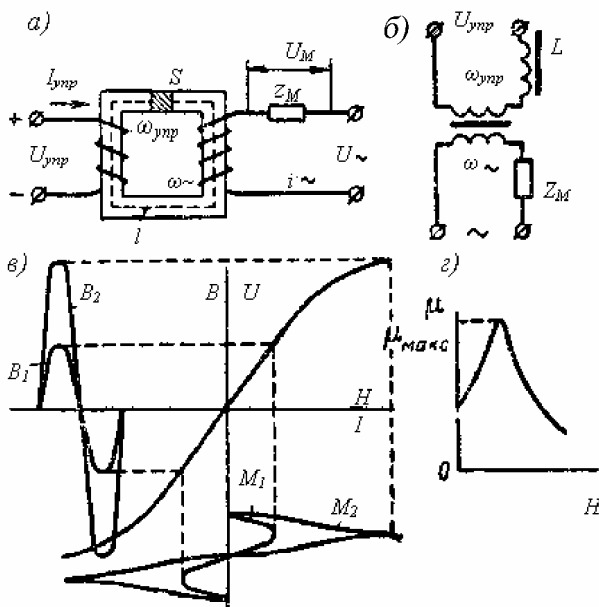


Рис. 240. Магнітний підсилювач (дросьель насичення):
а – схема вмикання; б – умовне позначення; в – форма кривої магнітної індукції і напруженості поля і напруги; г – залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля

Коли через обмотку керування ω_k проходить постійний струм, то крім змінних напруженостей H і магнітних індукцій B , з'являється постійні складові $H_{кер}$ і $B_{кер}$ від магнітного потоку $\Phi_{кер}$, суттєво збільшуючи сумарну напруженість H' , а отже зменшуючи магнітну проникність μ . Це в свою чергу впливає на індуктивність робочої обмотки L_p , індуктивний опір її X_c та струм в навантаженні

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \text{ А}, \quad (300)$$

при чому $\omega L \gg R$.

Якщо постійний струм підмагнічування (керування) використати як сигнал постійного струму, що підлягає підсиленню, то амплітуда змінного струму в навантаженні Z_n буде змінюватися

залежно від сигналу при одночасному перетворенні постійного за характером сигналу в змінний.

Коефіцієнт підсилення: по струму $k_i = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$; по потужності $k_p = P_{\text{вих}}/P_{\text{вх}}$.

Цей підсилювач має недоліки:

- змінний магнітний потік Φ_{\sim} наводить в обмотці ω_k змінну е.р.с., яка накладається на вхідний сигнал, затруднюючи керування підсиленням;

- струм навантаження (вихідний) має несиметричну форму в силу наявності гармонік.

Схему підсилювача без подібних недоліків наведено на рис. 241.

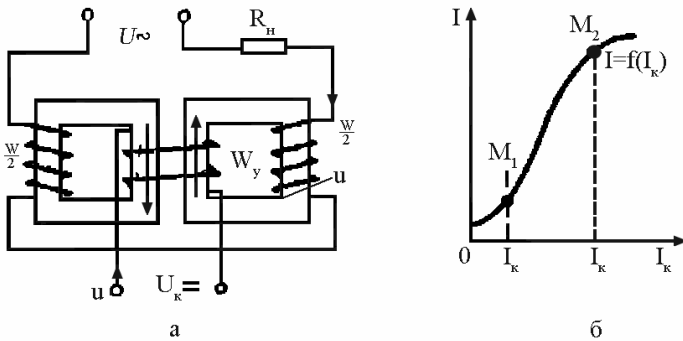


Рис. 241. Схема магнітного підсилювача з робочою обмоткою, розміщеною на різних стержнях (а); (б) – характеристика керування

Осердя підсилювача складається з двох окремих осердів, на яких розміщено половини робочих обмоток $\omega/2$ і обмотка керування (підмагнічування) з числом витків ω_k . Вхідною величиною підсилювача є постійний струм $I_{\text{кер}}$, а вихідний – I_n . Половини робочих обмоток намотані так, що в обмотці керування їх потоки направлені зустрічно і взаємно компенсуються. Чим більший постійний струм керування, більше насичення осердя, менша магнітна проникність μ , індуктивність L , реактивний опір X_L , більший струм вихідний (навантаження).

Ефект підсилення невеликого постійного вхідного струму наведено на графіку $I_{\text{вих}}=f(I_{\text{кер}})$ (робоча ділянка M_1 - M_2). При $I_{\text{вх}}=0$, струм вихідний відмінний від нульового значення.

Збільшити коефіцієнт підсилення і одержати симетричну відносно осі ординат (рис.242.) характеристику керування можна за

рахунок додаткової обмотки зміщення, розміщеної разом з обмоткою керування.

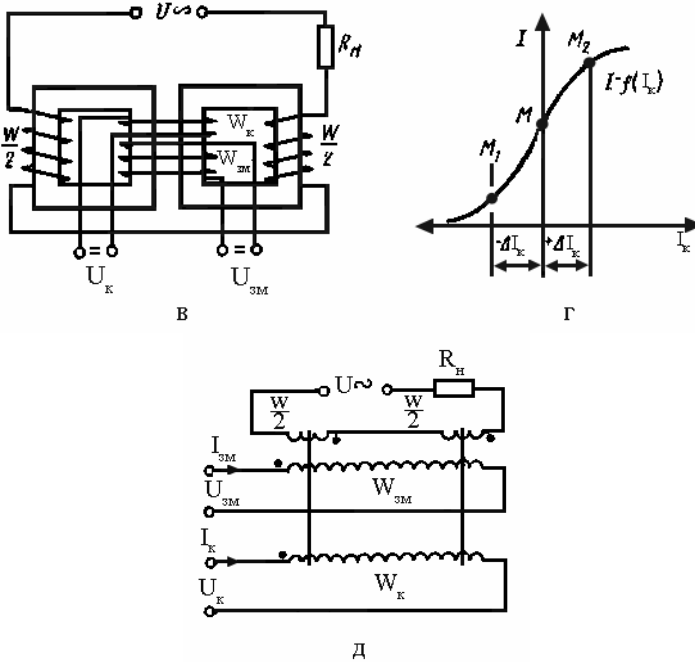


Рис. 242. Магнітний підсилювач з обмоткою зміщення (в);
 з – характеристика керування; д – умовне позначення

Обмотка зміщення створює додаткове підмагнічування осердя, змінюючи струм керування в межах $-\Delta I_k < I_k < +\Delta I_k$ при роботі на ділянці M_1-M_2 .

Розглянуті схеми однотактних магнітних підсилювачів можуть доповнюватися обмотками зворотних зв'язків, які поділяються на зовнішні, внутрішні, додатні, негативні, що змінюють якісні і кількісні характеристики підсилювачів.

Для забезпечення більшої крутизни характеристики $I_{вих} = f(I_{вх})$, зміни фази вихідної напруги на 180° при зміні полярності струму $I_{кер}$ та відсутності струму $I_{вих}$ при $I_{вх} = 0$ застосовують двотактні підсилювачі – диференціальні, мостові, трансформаторні, як відповідні схеми вмикання двох однотактних магнітних підсилювачів.

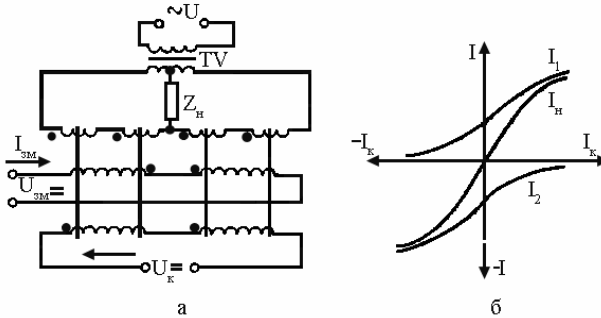


Рис. 243. Двотактний магнітний підсилювач:
а – принципова схема; б – характеристика керування

На рис. 243 наведено диференціальну схему двотактного підсилювача, в якій обмотки керування, зміщення ввімкнуті послідовно, а робочі – паралельно. Обмотка зміщення живиться постійним струмом. Обмотки керування створюють постійне магнітне поле. Поле однієї з них співпадає з полем обмотки зміщення, а поле іншої частини – направлене зустрічно. Коли струм керування $I_k=0$, струм на виході підсилювача (на опорі Z_n) відсутній, оскільки струми в робочих обмотках рівні і зсунуті на 180° . З появою струму керування виникає магнітне поле, яке в одному осерді складається з полем обмотки зміщення, а в другому – віднімається від нього, тому струм на виході першого підсилювача більший, ніж другий. Струм через опір Z_n рівний геометричній сумі струмів обох однокітних підсилювачів:

$$\bar{I}_n = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \quad (A), \quad (301)$$

що видно з графіка. При зміні полярності струму керування фаза струму навантаження зміниться на 180° .

Недолік диференціальної схеми – необхідність застосування силового трансформатора TV з середньою точкою.

У мостовій двотактній схемі відсутній трансформатор і чотири частини робочої обмотки утворюють міст змінного струму. При $U_{вх}=0$ міст знаходиться в рівновазі $I_{вих}=0$ (Z_n вмикається в діагональ моста). Наявність невеликого вхідного сигналу виводить міст з рівноваги, з'являється $I_{вих}$, амплітуда і фаза якого визначаються відповідно величиною і полярністю вхідного сигналу (мал.244).

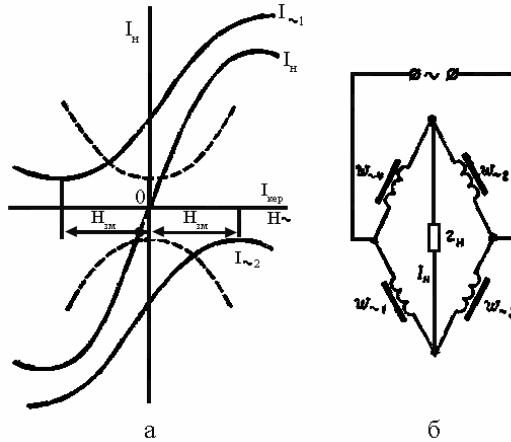


Рис. 244. Двотактний магнітний підсилювач:

а – характеристика керування; б мостова схема вмикання навантаження

Магнітні підсилювачі можуть працювати на навантаження постійного струму, яке підключається до виходу магнітного підсилювача через випрямляч.

Контрольні запитання

1. Яке призначення електричних підсилювачів та їх типи?
2. Які основні показники електричних підсилювачів?
3. Яке призначення багатокаскадних підсилювачів?
4. Принцип дії попереднього транзисторного підсилювача з фоновим струмом бази.
5. Робота попереднього підсилювача на транзисторі з фіксованою напругою зміщення на базі.
6. Роль пасивних, активних елементів попереднього підсилювача.
7. Які є види міжкаскадних зв'язків у багатокаскадному підсилювачі?
8. Пояснити режими роботи підсилювачів.
9. Пояснити роботу однокаскадного вихідного каскаду.
10. Привести схему двотактного вихідного підсилювача на транзисторах з двома е.р.с.
11. Пояснити роботу двотактного транзисторного підсилювача з одним джерелом е.р.с.

12. Яке призначення та робота магнітного одноконтурного підсилювача?

13. Пояснити роботу двоконтурних магнітних підсилювачів, їх призначення.

2.13. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ РЕЛЕЙНИХ СХЕМ АВТОМАТИКИ. ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

1. Основні поняття і визначення теорії релейних схем автоматики.
2. Аналітичний запис структури й умов роботи.
3. Основні записи алгебри логіки.
4. Безконтактні логічні й керуючі елементи.
5. Мінімізація релейних систем. Тригери і реєстри. Основні види логічних схем.

1. Основні поняття і визначення теорії релейних схем автоматики. Серед багатьох автоматичних пристроїв керування релейні схеми досить поширені. Для них характерним є скачкоподібна зміна вихідної регульованої величини при зміні вхідної величини, тобто кожний елемент релейної системи може приймати два стійких положення: ввімкнено або розімкнено. Умовно їх позначають символами “1” і “0”.

Наприклад, контакт реле може бути замкнений або розімкнений; транзистор – відкритий або закритий; електричне коло замкнене або розімкнене тощо.

Релейні схеми, як правило, складаються з контактних електромагнітних реле. За характером роботи релейні системи бувають одноконтурні і багатоконтурні. В одноконтурних системах стан виконавчих елементів однозначно визначається станом керуючих елементів у будь-який момент часу, в них певна комбінація вхідних сигналів відповідає тільки певному значенню вихідної величини (рис. 245 – проміжні елементи відсутні).

У багатоконтурних схемах між керуючими і виконавчими елементами є проміжні елементи, що забезпечують певну послідовність роботи їх, отже, вхідним величинам одної і тої комбінації, але поданим в різні моменти часу, можуть відповідати кілька функцій (вихідних величин).

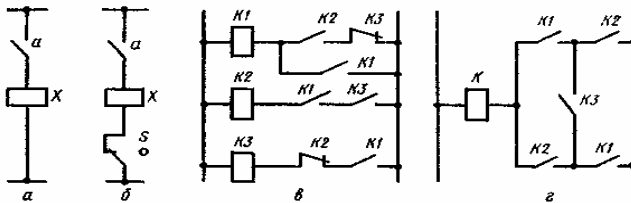


Рис. 245. Різновиди релейних схем:

a – одноконтрна; *б* – багатоконтрна; *в* – типу II; *г* – типу H

Зображення релейної схеми, де показано кількість і склад структурних елементів, з'єднання між ними, називають структурою релейної схеми. Частина схеми релейної, що складається тільки з контактів, називається контактною схемою. Структуру релейної схеми зображають графічно у вигляді символів елементів їх з'єднань згідно з ГОСТ 2.710 – 81. Так, котушки контакторів, магнітних пускачів, реле позначають К з відповідним номером (наприклад К1, КМ1, КА1, КV1 тощо). Аналогічно позначають контакти цих елементів (КМ1:1, КV1:2, КА1:3 тощо).

За видом з'єднань розрізняють схеми паралельно-послідовні, місткові, інверсні і т.п. Під час вивчення релейних систем автоматики вирішують в основному два завдання: перше – аналіз схем, тобто визначення умов роботи кожного реле, послідовності їх роботи, друге – синтез схем, тобто знаходження структури схеми за заданими умовами її роботи. Аналіз і синтез дають можливість одержати електричну схему системи з мінімально можливим числом реле та контактів, користуючись спеціальним математичним апаратом – алгеброю логіки.

2. Аналітичний запис структури і умов роботи. Релейну схему можливо подавати не тільки за допомогою графічних символів, а й використовувати буквені позначення, наприклад, котушки елементів – великими буквами латинського алфавіту (А, В...Х), замикаючі контакти малими буквами а, в, х, у, розмикаючі контакти – малими буквами з рискою над нею \bar{a} , \bar{b} , \bar{x} , \bar{y} тощо.

В алгебрі логіки застосовують тільки дві математичні операції: множення, що означає послідовне з'єднання контактів (а·в) та додавання, що означає паралельне з'єднання контактів (а+в). Структурна формула для схеми 246,б має такий вигляд:

$$F = (\bar{a}\bar{b} + c\bar{d}e + m)x \quad (302)$$

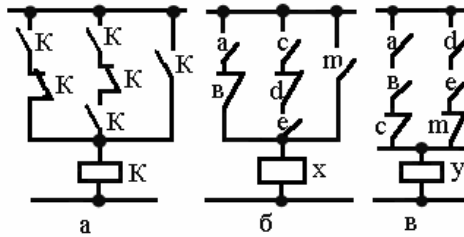


Рис. 246. Способи зображення релейних схем:
 а – з використанням графічних символів;
 б, в – з використанням буквених символів

З формули видно, що є три паралельні вітки контактів, де контакти a , \bar{b} , c , \bar{d} , e вмикаються послідовно. Вихідний сигнал буде у випадку, коли спрацює a і не спрацює \bar{b} або спрацює c і e , але не спрацює \bar{d} , або спрацює m . Якщо умови роботи, наприклад, елемента y наведені словами, то по них складають відповідну структурну формулу і схему. Нехай елемент y повинен спрацювати: при спрацюванні контактів a і v і неспрацюванні c ; при спрацюванні елементів d і e і неспрацюванні m . Структурна формула при цьому має вигляд:

$$F = (авс + dem)y, \quad (303)$$

а схему наведено на рис.246, в. Зазначимо, що постійно замкнене коло позначають символом -1 , постійно розімкнене коло -0 ; f – структурна формула контактів; F – структурна формула схеми.

3. Основні записи алгебри логіки. У контактних релейних схемах автоматики контакт схеми може бути у двох станах: розімкненому або замкненому і також вся структурна формула може зображати замкнене або розімкнене коло, тобто стан 1 або 0.

В булевій алгебрі розрізняють чотири пари законів (відносно додавання і множення), які дають можливість встановити рівносильність різних виразів, можливість замінити один вираз іншим, одну схему іншою. Як символ рівносильності використовується символ рівності ($=$).

Розглянемо основні закони та наслідки, що випливають з них, встановлюючи їх справедливність аналізом схем, відповідно правих і лівих частин рівносильних виразів.

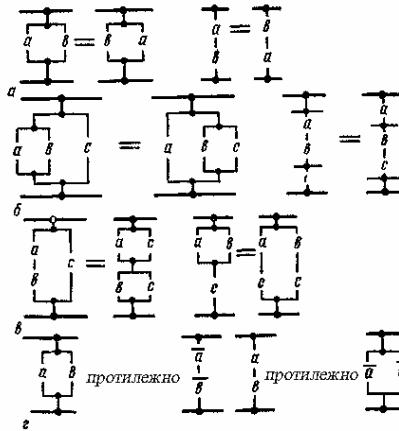
Перший закон – переставний. Відносно додавання: $a+v=\bar{v}+\bar{a}$ – при зміні місць паралельно з'єднаних контактів робота схеми не

порушується. Відносно множення: $a \cdot v = v \cdot a$ – при перестановці місцями послідовно з'єднаних контактів дія схеми не змінюється.

Другий закон – сполучний. Відносно додавання: $(a+v)+c=a+(v+c)$, рис. 247., відносно множення – $(a \cdot v) \cdot c = a \cdot (v \cdot c)$.



*a, б – переставний закон; в, з – сполучний закон;
д, е – розподільний; є, ж – інверсії*



*а – переставний закон; б – сполучний закон;
в – розподільний; г – інверсії*

Рис. 247. Схеми, що ілюструють основні закони теорії релейних пристроїв

Третій закон – розподільний: відносно додавання: $(a+v) \cdot c = \overline{a} \cdot c + v \cdot c$, відносно множення – $a \cdot v + c = (a+v) \cdot (v+c)$.

Четвертий закон – закон інверсії: відносно додавання: $\overline{a} + \overline{v} = a \cdot v$ (рис.247, є), тобто, для замикання кола достатньо, щоб спрацювало хоча б одне реле (щоб замкнулися контакти а чи в), або протилежна дія – для розмикання кола достатньо, щоб спрацювало хоча б одне

реле (щоб розімкнулися розмикаючі контакти а чи в). Відносно множення: $a \cdot v = a + v$ (рис.247, ж), тобто для замикання кола при послідовному з'єднанні контактів потрібно, щоб спрацювали обоє реле, щоб замкнулися контакти а і в, або протилежна дія – для розмикання кола, при паралельному з'єднанні контактів треба щоб спрацювали обоє реле (щоб розімкнулися контакти а і в). Довга риска над контактами $a+v$ і $a \cdot v$ означає, що потрібно брати заперечення від даного виразу (інверсії), а в правій частині ($a \cdot v$ та $a + v$) записаний вираз, який має зворотне значення по відношенню до вихідного.

Рівносильність поданих на рис. 247 схем не викликає сумнівів. Більш того, переставний, сполучний та розподільний закони відносно додавання аналогічні законам звичайної алгебри. Виняток складають закони інверсії та розподільний закон відносно множення, які зустрічаються тільки в булевій алгебрі (у звичайній алгебрі вони пояснюються по-іншому).

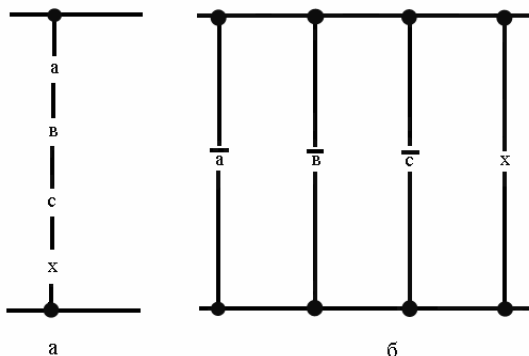


Рис. 248. Пряма (а) та інверсна (б) схеми вмикання

Наприклад, при послідовному з'єднанні контактів а, в, с і котушки X маємо структурну формулу

$$F = a \cdot v \cdot c \cdot X \tag{304}$$

Для одержання інверсної (зворотної події) схеми потрібно взяти інверсію від цього виразу, тобто (рис.248).

$$F_1 = F = \overline{a \cdot v \cdot c \cdot X} = \overline{a} + \overline{v} + \overline{c} + X$$

Над символом обмотки реле знак інверсії не ставиться.

При аналізі і спрощенні формул релейних систем користуються не тільки законами алгебри логіки, а й висновками з них, наприклад:

$a\bar{a} = 0$ – коло розімкнене	$a+\bar{a} = 1$ – коло замкнене
$a \cdot 1 = a$	$a + 1 = 1$
$a \cdot 0 = 0$ – коло розімкнене	$a+0 = a$
$a \cdot a = a$	$a+a+a = a$
$a+a \cdot v = a(1+v) = a$	$a \cdot (a+v) = a$
$a+\bar{a} \cdot v = a+v$	$\bar{a}+a \cdot \bar{v} = \bar{a}+\bar{v}$

Неважко переконатися в цьому, зарисувавши відповідні релейні контактні схеми.

За аналогією для будь-якої релейної схеми можна знайти рівносильну за дією схему, в якій всі послідовно ввімкнені контакти і обмотки реле будуть замінені на паралельно ввімкнені, а всі паралельні кола – на послідовні; всі замикаючі контакти – на розмикаючі, а розмикаючі – на замикаючі (рис. 249).

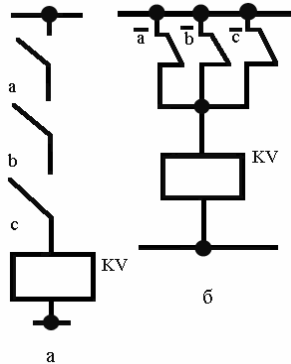


Рис. 249. Схеми вмикання реле:
a – пряма; б – інверсна

4. Безконтактні логічні й керуючі елементи. У схемах автоматики приходиться виконувати дії логічного типу між вхідними і вихідними величинами: “І”, “АБО”, “НІ”, “ПАМ’ЯТЬ”, “ЗАТРИМКА”, “ЗАБОРОНА” тощо.

Найбільш поширені логічні елементи: “І”, “АБО”, “НІ” та їх комбінації.

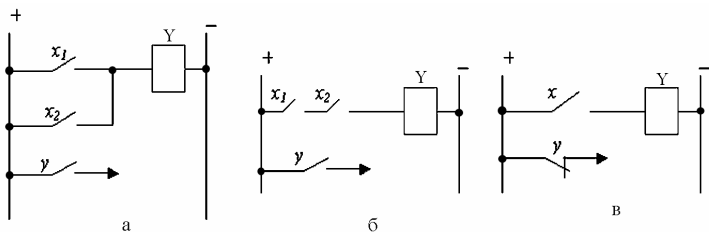


Рис. 250. Схеми реалізації логічних функцій:
a – схема “АБО”; б – схема “І”; в – схема “НІ”

Реалізацію основних логічних функцій проілюструємо на прикладі релейно-контакторних схем (рис. 250). У схемі “АБО” реле Y спрацює і ввімкне свої контакти y при замиканні контактів x_1 або x_2 . У схемі “І” реле Y спрацює тільки при замиканні контактів нормально відкритих x_1 і x_2 , після чого замикається контакт y . У схемі “НІ” при замиканні контакта x спрацьовує реле Y , розмикаючи контакт y . Цю ж операцію можна реалізувати інверсною схемою, ввімкнувши паралельно до обмотки реле Y , нормально закритий контакт x . (рис. 252).

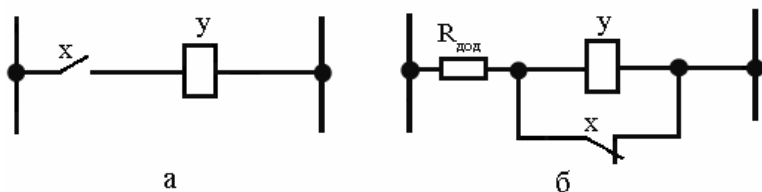


Рис.251. Схеми керування роботою реле:
a – пряма; б – інверсна

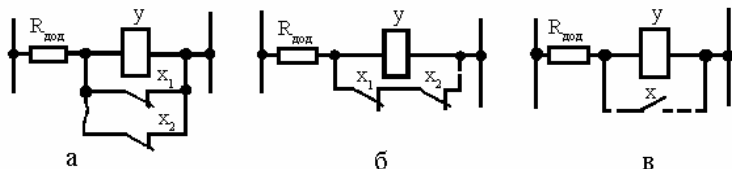


Рис. 252. Інверсні схеми логічних функцій:
a – схема “І”; б – схема “АБО”; в – схема “НІ”

Релейні контакти в схемах автоматики можна замінити безконтактним елементом, наприклад, транзистором у ключовому режимі. При відсутньому струму бази, транзистор закритий і напруга колектора $U_{e,к} \approx E_к$. Функція приймає значення "1". При появі вхідного сигналу на базі транзистора він відкривається $U_{e,к} \approx 0$, сигнал на виході відсутній, функція приймає значення "0".

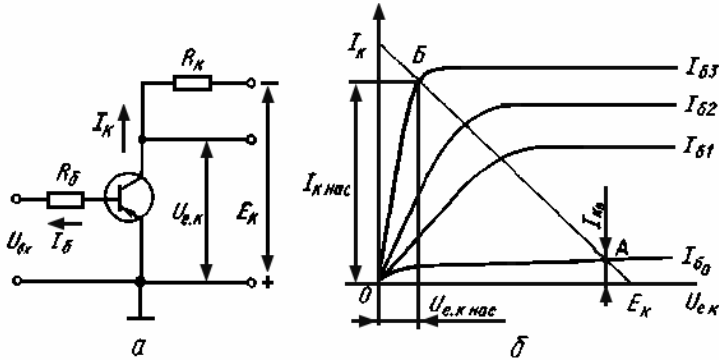


Рис. 253. Робота транзистора в ключовому режимі:
а – схема вмикання; б – вольт-амперні характеристики

Якщо реле приєднати до виходу транзистора (рис.254), то в режимі насичення (транзистор відкритий) котушка реле Y буде зашунтована, воно не спрацює, а в режимі "1" при закритому транзисторі реле Y спрацює від поданого на нього сигналу.

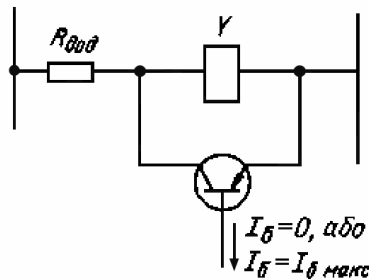


Рис. 254. Схема вмикання реле на вихід транзистора

Схему реального елемента “НІ” на транзисторі наведено на рис. 255 за наявності вхідного сигналу $U_{вх}$ вихідна напруга зникає, так як транзистор відкривається. Напруга зміщення $U_{зм}$ прикриває транзистор подачею на базу додатнього потенціалу, щоб транзистор помилково не спрацював від випадкових малих сигналів.

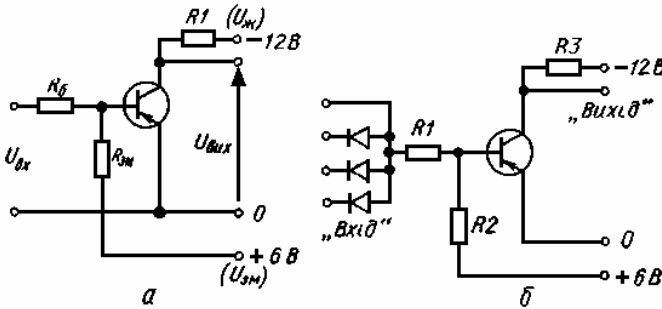


Рис. 255. Реалізація логічних функцій на транзисторах:
а – схема “НІ”; б – схема “АБО” – “НІ”

Аналогічно реалізуються елементи логічні “АБО-НІ”, подавши на вхід декілька вхідних сигналів. Умовні позначення логічних елементів наведено на рис. 256.

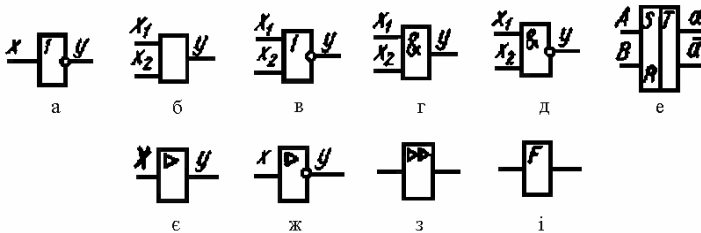


Рис. 256. Умовні позначення логічних і функціональних елементів у структурних схемах:
а – “НІ”; б – “АБО”; в – “АБО” – “НІ”; г – “І”; д – “І” – “НІ”;
е – тригер; є – підсилювач; ж – підсилювач інвертор;
з – підсилювач потужності; і – формувач сигналі

У схемах сільськогосподарської автоматики застосовують елементи серії “Логіка-Т”, що включає 21 елемент чотирьох різних груп: семи логічних елементів Т-101...Т-107; чотирьох функціональних

елементів Т-201...Т-203 і Т210; чотирьох елементів часу Т-301...Т-304 та шести вихідних підсилювачів Т-401...Т406.

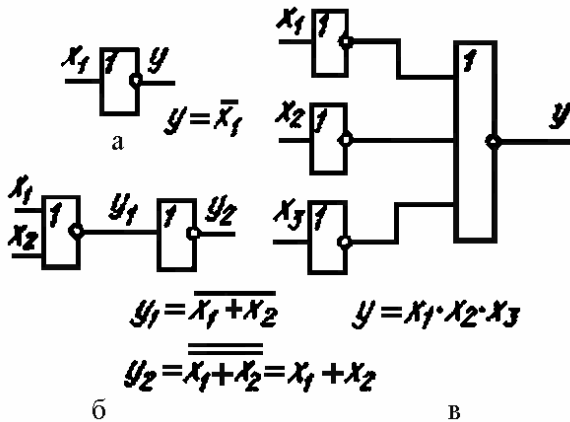


Рис. 257. Реалізація основних логічних функцій за допомогою логічних елементів “АБО-НІ”: а – схема “НІ”; б – схема “АБО”; в – схема “І”

Конструктивно елементи оформлені у вигляді окремих модулів: напівпровідникових приладів, резисторів, конденсаторів тощо на платах з друкованим монтажем. Конструкція елементів нерозбірна, залита компаундом і зовні розрізняється габаритами (19 і 29 мм). Реалізація основних логічних функцій за допомогою елемента “АБО-НІ” наведено на рис. 257. Так на серії “Логіка-Т” побудовані станції керування заглибними насосами ШЭТ-5801, ШЭТ-5804. Різні алгоритми керування реалізуються елементами серії “Логіка-І”, що складається з: логічних І-101...І-112; І-122...І-123; логіко-цифрових І-113...І-121; функціональних І-201...І-209; часу І-301...І-302; підсилювальних І-401...І-406; додаткові: монтажні І-501, контрольні І-502. Логічні елементи реалізують функції алгебри логіки і збереження інформації.

Логіко-цифрові елементи реалізують різні алгоритми керування цифрових схем середньої складності.

Функціональні елементи приймають, перетворюють сигнали від зовнішніх джерел інформації до виду, придатному для передачі на

логічні елементи. Елементи часу реалізують затримку в часі формування імпульсів різної тривалості і частоти.

Підсилювальний елемент підсилює вихідні з логічних елементів сигнали і передає їх на керуючі пристрої (електричні реле, пускачі та контактори).

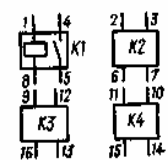
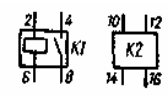
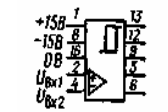
5. Мінімізація релейних систем. Суть мінімізації в тому, щоб використовуючи алгебру логіки найти для релейної системи автоматики оптимальний її варіант з мінімальним числом елементів (обмоток реле, контактів тощо).

Серед різних способів мінімізації схем найбільш поширені для одноконтурних схем – аналітичний, графоаналітичний, табличний тощо.

Розглянемо аналітичний спосіб мінімізації релейних схем, коли для даної схеми записують логічну функцію і застосовуючи закони алгебри логіки та їх висновки, знаходять мінімальну форму запису функції.

Таблиця 9

Функціональні елементи серії “Логіка-І”

Тип	Призначення і коротка характеристика	Технічні характеристики	Графічні позначення
1	2	3	4
И-201	Вхідний погоджувальний елемент з чотирма електричними незв'язаними герконовими реле РПГ-6	$U=24\text{ В}$ $\Gamma 2$	
И-202 И-203 И-204	Вхідний погоджувальний елемент з двома електричними незв'язаними герконовими реле РПГ-6	$U=48\text{ В}$ $U=60\text{ В}$ $U=110\text{ В}$ $\Gamma 2$	
И-205	Аналогічний компаратор і пороговий елемент	$U=\pm 15\text{ В}$ $U_{\text{ВХ}1,2}=0\dots 10\text{ В}$ $I_{\text{ВХ}}=5\text{ мА}$ $\Gamma 2$	

1	2	3	4
И-206	Вхідний погоджувальний елемент з герконовим реле РПГ-6	$U \approx 220 \text{ В}$ $\Gamma 2$	
И-207	Вхідний погоджувальний низькочастотний елемент на оптопарах	$U = 15 \text{ В}$ $U_{\text{вх}1} = 24 \text{ В}$ $U_{\text{вх}2} = 15 \text{ В}$ $f = 1 \text{ Гц}$ $k = 10$ $\Gamma 2$	
И-208	Вхідний погоджувальний елемент з трьома електрично незв'язними герконовими реле РПГ-3	$U = 24 \text{ В}$ $\Gamma 2$	
И-209	Вхідний погоджувальний високочастотний елемент на оптопарах	$U = 15 \text{ В}$ $U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}$ $k = 10$ $f = 5 \text{ кГц}$ $\Gamma 2$	

Приклад 1. Для даної релейної схеми виконати спрощення (мінімізацію) та накреслити спрощену схему (рис.258).

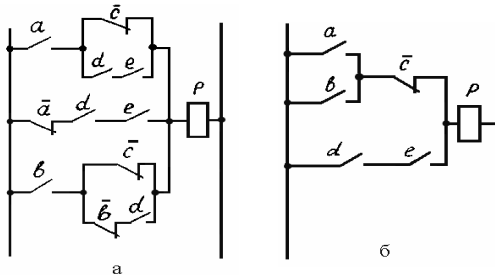


Рис. 258. Релейна схема (а) та спрощена релейна схема (б)

Запишемо структурну формулу контактів схеми

$$f = a(\bar{c} + de) + \bar{a}de + b(\bar{c} + \bar{b}d). \quad (305)$$

Розв'язання.

1. Виконаємо спрощення структурної формули, розкривши дужки

$$f = a\bar{c} + ade + \bar{a}de + b\bar{c} + \bar{b}bd.$$

2. Застосуємо наслідки алгебри логіки

$$v \cdot \bar{v} = 0 \quad 0 \cdot d = 0.$$

3. Проведемо групування подібних виразів та спільні множники винесемо за дужки

$$f = \bar{c}(a+v) + de(a+\bar{a}).$$

Оскільки $a+\bar{a}=1$ – коло замкнуте, то

$$f = \bar{c}(a+v) + de.$$

Як видно в спрощеній схемі менше контактів, вона простіша, надійніша (рис.258.б).

Крім законів та наслідків алгебри логіки, для спрощення схем доцільно використати такі дві теореми (без доведення):

Теорема 1. Якщо є схема, яка з'єднана паралельно із замикаючим контактом X , то всі контакти “ X ” у схемі замінюються нулями, а контакти \bar{X} – одиницями

$$F = x + f(x, \bar{x}, y, \dots, \omega) = x + f(0, 1, y, \dots, \omega).$$

Якщо схема з'єднана паралельно з розмикаючим контактом X , то

$$F = \bar{x} + f(x, \bar{x}, y, \dots, \omega) = \bar{x} + f(1, 0, y, \dots, \omega).$$

Приклад 2. Спростити структурну формулу.

$$F = x + a[(xc+a)v + \bar{x}av(c+v)]$$

Розв'язання. Застосуємо теорему 1, тобто $x=0 \quad \bar{x}=1$

$$F = x + a[(0c+a)v + 1av(c+v)].$$

Оскільки $0 \cdot c = 0$; $1 \cdot a \cdot v = av$, то

$$F = x + a[av + av(c+v)] = x + a \cdot av[1 + (c+v)].$$

$1 + (c+v) = 1$ – коло замкнене $a \cdot av = av$, тому $F = x + av$ – одержали мінімізовану схему, де контакт X вмикається паралельно до послідовної мережі з контактів a та v .

Теорема 2. Якщо яка-небудь схема ввімкнена послідовно із замикаючим контактом X , то всі контакти X схеми замінюють одиницями, а контакти \bar{X} – нулями

$$F = x \cdot f(x, \bar{x}, y, \dots, \omega) = x \cdot f(1, 0, y, \dots, \omega).$$

Якщо схема з'єднана послідовно з розмикаючим контактом X , то заміна буде протилежна $x=0 \quad \bar{x}=1$, тобто

$$F = \bar{x} \cdot f(x, \bar{x}, y, \dots, \omega) = \bar{x} \cdot f(0, 1, y, \dots, \omega).$$

Приклад 3. Спростити структурну формулу

$$F = \bar{x}[(xc+a)v + \bar{x}a(a+v)]$$

Розв'язання: застосуємо теорему 2.

$$F = \bar{x}[(xc+a)v + \bar{x}a(a+v)] = \bar{x}[(0 \cdot c+a)v + 1a(a+v)] = \bar{x}[av+a(a+v)] = \bar{x} \cdot a[v+(a+v)] = \bar{x} \cdot a(a+v) = \bar{x} \cdot a.$$

Приклад 4. Спростити структурну формулу

$$F = xa[(xc+a)v + \bar{x}av(c+v)]$$

Розв'язання: застосуємо теорему 2.

$F = xa[(1 \cdot c+a)v + 0 \cdot av(c+v)] = xa[(c+a)v] = xav(c+a)$ – одержали значно простішу схему.

5. Тригери і регістри. Основні види логічних схем. Тригер – це логічний пристрій, який має два стійких стани рівноваги і скачкоподібно переходить по сигналу ззовні з одного в інший стан. Вхідні сигнали повинні бути дискретними. Виконуються переважно на мікросхемах і застосовуються в ЕОМ та системах автоматики, телемеханіки, вимірвальній техніці. Їх виготовляють по інтегральній технології з активних (транзистори, реле, електронні лампи) та пасивних (резистори, конденсатори, котушки) елементів. За функціональною ознакою тригери діляться на тригери з роздільним запуском (RS-тригер), з елементами затримки (Д-тригер), універсальні (JK-тригери), лічильні тригери Т тощо.

За способом керування тригери діляться на асинхронні (переключаються практично при подачі вхідного сигналу) і синхронізуючі (переключаються при подачі крім вхідного сигналу спеціального синхронізуючого сигналу на входження “С”).

Більшість тригерів реалізують у вигляді певної комбінації логічних елементів. Розглянемо роботу симетричного тригера з незалежним зміщенням (рис. 259).

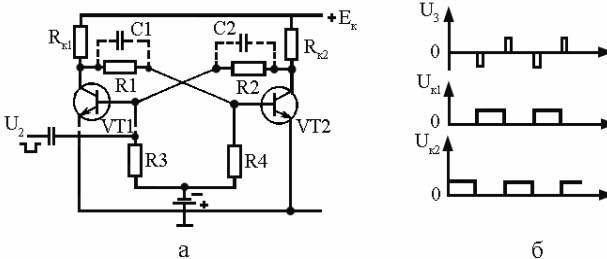


Рис. 259. Схема роботи симетричного тригера:
а – принципальна електрична схема тригера з незалежним зміщенням; б – потенціальна діаграма роботи тригера

Тригер – це двокаскадний транзисторний підсилювач, де кожний каскад працює в режимі транзисторного ключа у схемі $R_{k1}=R_{k2}$; $R_1=R_2$; $R_3=R_4$. Обидва каскади тригера охоплені додатним зворотним зв'язком (вихід першого каскаду через резистор R_1 з'єднаний з входом другого і навпаки – вихід другого каскаду через R_2 пов'язаний з входом VT1 першого каскаду).

Транзистори VT1 і VT2 працюють із спільним емітером. Резистори R3, R4 обмежують струм бази джерела E_6 .

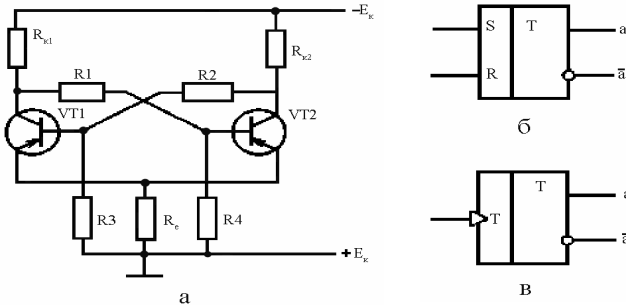


Рис. 260. Схема симетричного тригера з автоматичним (залежним) зміщенням

а – схема тригера; умовні позначення Т – тригер (б) і SR – тригера (в)

При вмиканні джерела живлення E_6 , відкриється один з транзисторів, наприклад VT1, тоді VT2 буде закритий. Потенціали виводів транзистора VT1 приблизно рівні відносно землі $U_{k1}=U_{61}=U_{e1}=0$. VT2 при цьому закритий від'ємним потенціалом U_{62} . Відкритий стан транзистора VT1 n-p-n структури підтримується струмом $I_{61} = \frac{E_6}{R_2}$, а струм $I_{62} = -I_{k0}$ рівний зворотному струму колекто-

ра VT2. Такий стан може бути як завгодно довго. При надходженні на базу VT1 від'ємного запираючого імпульсу з амплітудою $\geq E_6$, він закривається, а на базі VT2 збільшується відкриваючий додатний потенціал через збільшення додатного потенціалу бази VT1, що закривається. Тож VT2 відкриваючись, зменшує потенціал свого колектора. Цей потенціал передається через R_2 на базу VT1, який ще швидше почне закриватися. Розвивається лавиноподібний процес, який проводить до іншого стану: VT1 – закривається, VT2 – відкривається. Перехід тригера із одного стану в інший стійкий, можливо

різнополярними імпульсами запуску U_3 по одній з баз чи колекторів транзисторів (роздільний запуск), або лічильний запуск, коли однополярні імпульси подаються відразу на дві бази чи два колектора (лічильники імпульсів). На рис. 260 наведено схему симетричного тригера з автоматичним зміщенням (джерело E_6 відсутнє), за рахунок напруги на резисторі R_2 в колі емітера, що виникає від струму відкритого транзистора. Конденсатори, ввімкнені паралельно R_1 і R_2 , прискорюють встановлення нового стійкого стану тригера.

В позначенні тригерів Q і \bar{Q} означає прямий та інверсний виходи, тобто логічні рівні напруги на них протилежні (якщо Q -високий, то \bar{Q} - низький) рис. 261.

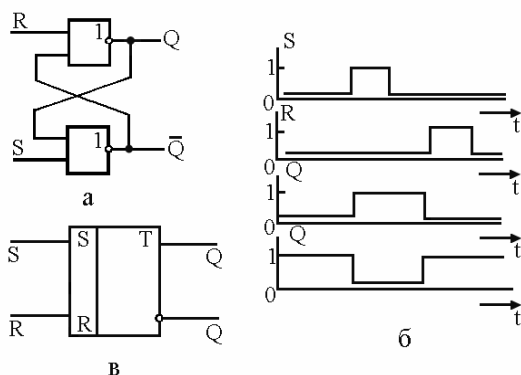


Рис. 261. RS – тригер побудований на двох АБО-НІ елементах:
а – схема тригера; б – умовне позначення RS – тригера;
в – часова діаграма роботи RS тригера

RS – тригер можна виготовити з двох елементів АБО-НІ, якщо їх з'єднати відповідним чином. У тригері вхід установки S (Set-установка) та скидання R (Reset-скидання).

Якщо на анод S подати сигнал 1 ($S=1$), то на прямому виході Q буде сигнал 1, тобто $Q=1$, $\bar{Q}=0$. Якщо на вхід скидання R подати 1 $R=1$, то схема переходить у протилежний стан $Q=0$, $\bar{Q}=1$. Якщо $R=0$ $S=0$ – схема стану не змінює, якщо $S=1$ $R=1$ – заборонено, оскільки стан Q і \bar{Q} при цьому невизначені.

Схему синхронізуючого тригера можна реалізувати за рахунок двох елементів І та двох – АБО-НІ з перехресним зв'язком. При цьому

входи R і S виходи Q і \bar{Q} залишаються і додається синхронізуючий вхід C, що надходить на обидва елементи I (рис.262).

Схема D-тригера реалізована одним елементом ІІ, двома – І та двома елементами АБО-ІІ.

Регістр – це сукупність тригерів та логічних елементів, яким властиво приймати, зберігати, за командою видавати числові коди, виконувати нескладні порозрядні операції тощо.

Регістри діляться на регістри паралельної і послідовної дії або накопичуючі і регістри зсуву інформації. Накопичуючі регістри можуть приймати, запам'ятовувати, видавати числову інформацію, тоді як регістри зсуву зсувають інформацію вліво чи вправо.

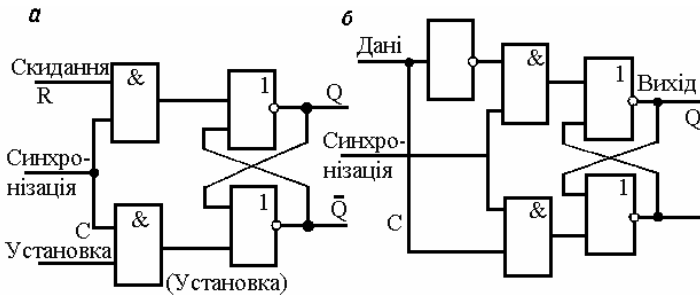


Рис. 262. Схема синхронного тригера:
а – синхронізуючий RS – тригер; б – синхронізуючий RS тригер (D – тригер)

Схему накопичуючого регістра для приймання, збереження трирозрядного двійкового числа наведено на рис. 263. Він складається з трьох RS-тригерів з прямими входами і шести елементів І, з яких: I_1, I_3, I_5 тобто з непарними номерами, встановлені на входах тригерів, а решта – на прямих виходах тригерів. Входи тригерів R з'єднані з шиною "уст.0". На перші входи елементів І $x_1; x_2; x_3$ надходять коди чисел для їх запису, а їх другі входи з'єднанні з шиною генератора імпульсів запису U_3 . Інформацію беруть з виходів y_1 - y_3 конденсаторів (виходи елементів I_2, I_4, I_6).

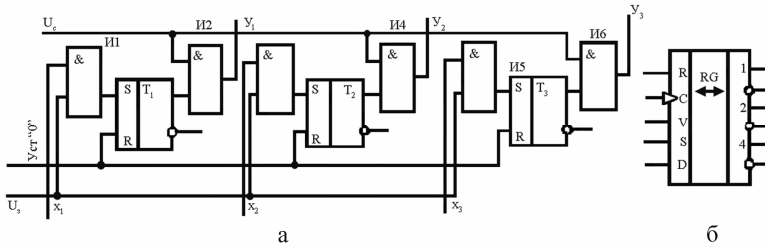


Рис. 263. Схема трирозрядного регістра:
а – схема накопичуючого регістра;
б – умовне позначення його

Робота накопичуючого регістра в тому, що перед записуванням на шину “уст.О” подають імпульс скидання і всі тригери знаходяться при цьому у вихідному положенні ($Q=0, \bar{Q}=1$). Записування чисел можливо при одночасному надходженні сигналів на входи x_1, x_2, x_3 та наявності імпульса запису U_3 .

Тригери з високим потенціалом “1” на вході переводяться в стан “1” на прямих виходах, а тригери розрядів числа двійкового з низьким потенціалом “0” остаються у вихідному положенні. Наприклад, при записі двійкового числа 101 (десяткове 5) тригери T_1, T_3 з потенціалом “1” перекинуться в інший стан, а тригер T_2 з низьким потенціалом “0” останется у вихідному положенні. Під час запису числа 111 (десяткове 7) спрацюють всі тригери. Для зчитування інформації подають на шину U_c імпульс зчитування U_c на другі входи елементів $\dot{I}_2, \dot{I}_4, \dot{I}_6$, відкриває їх і на виходах Y_1, Y_2, Y_3 виникне код записаного в регістрі числа.

Збільшуючи кількість комірок (один тригер і два кон’юнктора) збільшують відповідно двійкове число для запису.

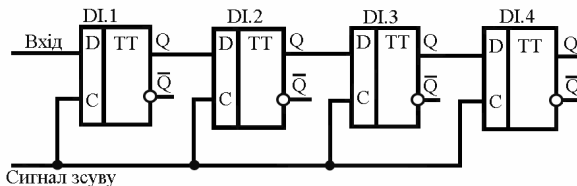


Рис. 264. Схема чотирирозрядного регістра послідовної дії

Регістр складається з чотирьох Д-тригерів відповідно до значимості кода числа. Сигнали зсуву подаються на входи С тригерів затримки, вхідні сигнали – на вхід Д першого тригера.

В ЕОМ застосовують такі реєстри:

- реєстр-аккумулятор (просто аккумулятор) – для тимчасового збереження операнда або проміжних результатів обчислень в АЛП;
- реєстр команд – для зберігання коду наступної операції, адрес якої є в програмному лічильнику;
- реєстр стану – набір тригерів, стан яких (0 або 1) залежить від результатів операцій в АЛП;
- буферний реєстр адресів – для приймання, зберігання адресної частини команди, що виконується;
- буферний реєстр даних – тимчасово зберігає вибрані із пам'яті слова;
- буферний реєстр АЛП – тимчасово зберігає слова даних. (Якщо в арифметичній чи логічній операції беруть участь два слова, то одне з них зберігається в буферному реєстрі АЛП).

Контрольні запитання

1. Які основні властивості релейних контактних схем?
2. Як записати аналогічно структурну формулу для поданої релейної схеми?
3. Пояснити структурну формулу $F = a\bar{b} + c\bar{d}e + \bar{m}$.
4. Пояснити основні закони теорії релейних пристроїв.
5. Пояснити закон розподільний відносно додавання $(a+b)c = ac + bc$ з допомогою електричного з'єднання контактів.
6. Зарисувати схему відповідно до таких структурних формул:
 - 6.1. $F = (a\bar{b} + a\bar{b} + a\bar{b})\bar{b}c$
 - 6.2. $F = \bar{a}\bar{b} + c + (a+b)c$
 - 6.3. $F = a\bar{b} + c + (a+b)c$
 - 6.4. $F = \bar{c}(\bar{a}\bar{b} + c)(\bar{a} + \bar{b})$
 - 6.5. $F = a\bar{b}c + \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}\bar{b}c + a\bar{b}c$
7. Яке призначення та робота основних логічних елементів?
8. Яка суть мінімізації релейних схем та основні прийоми, що застосовують при цьому?
9. Пояснити на прикладах застосування двох теорем для мінімізації релейних схем (для схем з паралельним і послідовним з'єднанням з контактом X).

2.14. ОБ'ЄКТИ РЕГУЛЮВАННЯ І РЕГУЛЯТОРИ

1. Сільськогосподарські об'єкти керування.
2. Функції регулятора, класифікація регуляторів.
3. Статичні й астатичні регулятори.
4. Регулятори пропорційної дії.
5. Регулятори інтегральної дії (I-регулятори).
6. Регулятори пропорційно-інтегральної дії.

1. Сільськогосподарські об'єкти керування. Сільськогосподарське виробництво характеризується великою кількістю, різноманітністю об'єктів регулювання – теплогенераторів, водопідігрівачів, калориферів, котелень тощо, в яких потрібно регулювати температуру, кількість повітря, палива тощо.

Властивості об'єктів суттєво впливають на процес керування, тому під час аналізу роботи автоматичної системи їх потрібно враховувати. До основних властивостей об'єктів керування належать статична і динамічна характеристики, акумулююча здатність, самовирівнювання, запізнення процесу в об'єкті, час розгону об'єкта. Деякі з цих властивостей охарактеризовано раніше, решту з них наведемо нижче. Статична характеристика $y=f(x)$ – це залежність керуваної величини y від задаючої дії x в усталеному режимі при постійному зовнішньому збуренні $F=\text{const}$. Якщо статична характеристика лінійна, об'єкт називають також лінійним, у протилежному разі – нелінійним (рис. 265).

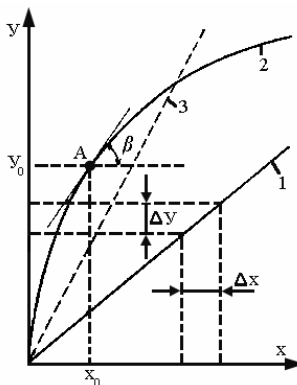


Рис. 265. Статичні характеристики об'єктів:
1 – лінійна; 2 – для нелінійних об'єктів

Для полегшення аналізу роботи схеми автоматики проводять лінеаризацію статичних характеристик, тобто нелінійну статичну характеристику замінюємо приблизно лінійною на окремій ділянці характеристики або повністю, враховуючи положення робочої точки А. Помилка при лінеаризації буде тим меншою, чим менше відхилення змінної вхідної величини X від X_0 . Точніше, статична характеристика описується рівнянням $\Delta y = k \cdot \Delta x$, де $k = dy/dx = \text{tg}\beta$ – передаточний коефіцієнт.

Крім того, статичні характеристики будують у відносних значеннях вхідної X_0 і вихідної Y_0 величин, що полегшує порівняння між собою характеристик різних елементів автоматики і об'єктів,

$$y_0 = kx_0, \text{ де } x_0 = x/x_0; y_0 = y/y_0.$$

Динамічна характеристика – це залежність $y(t)$ від задаючої дії $x(t)$ в перехідному режимі. Зв'язок між цими параметрами описується диференціальними рівняннями.

Технологічний процес в об'єкті керування пов'язаний з припливом, витратою, накопиченням, перетворенням певного матеріального середовища чи енергії. У процесі роботи об'єкти можуть накопичувати робоче середовище, наприклад у водокаччі створюється запас води, маховик вала двигуна автомобіля накопичує енергію обертання, у водонагрівачах акумулюється тепло тощо. Властивість об'єкта накопичувати енергію, речовину називають акумулюючою, яку оцінюють по ємності об'єкта і чим вона більша, тим повільніше змінюється керована величина при збурюючих діях і навпаки. Цей вплив характеризується коефіцієнтом ємності $c = C/y$, де C – ємність об'єкта; y – керована величина.

Так, при регулюванні рівня води у водокаччі c рівне кількості води (м^3), необхідне для зміни рівня її на 1 м, а при регулюванні температури c – кількість тепла (КДж), необхідне для зміни температури на один градус.

Чутливість об'єкта до зовнішніх збурень характеризується коефіцієнтом v

$$v = \frac{dy}{\Delta F}$$
 – швидкість зміни керованої величини dy/dt до зміни збурення ΔF .

За величиною C об'єкти регулювання бувають безємнісними, одноємнісними, багатоемнісними (рис. 266). Для об'єкта характерна

інертність, запізнення в часі між зміною керованої дії, що надходить на об'єкт і відповідною зміною керованої величини.

Розрізняють запізнення перехідне τ_n та транспортне τ_0 . Запізнення τ_n визначається наявністю на об'єктах ємності, індуктивності, обертових мас тощо. Для нагрівача це час від моменту подачі тепла до моменту зміни температури його.

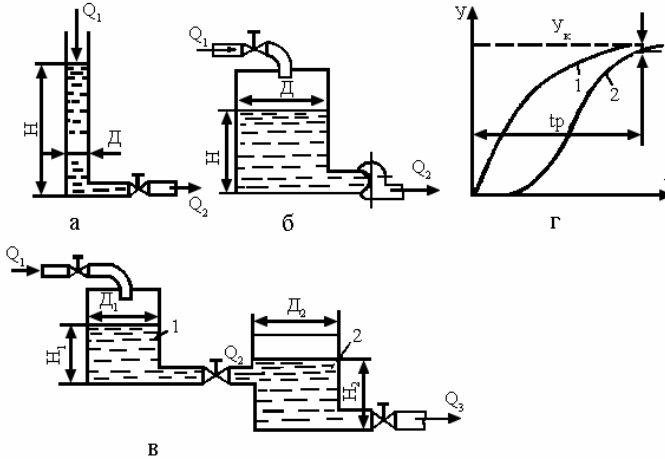


Рис. 266. Об'єкти з різними акумулюючими властивостями:
*а – без'ємнісний ($H \gg D$); б – одноємнісний (H і D приблизно однакові);
 в – двоємнісний; г – криві запізнення*

Запізнення τ_0 визначається наявністю між керуючим органом і виходом об'єкта передаточної ланки (транспортери, трубопроводи тощо). Це час для компенсації впливу зазорів, сил тертя, індуктивностей, ємностей, затримок спрацювання реле та ін.

Для порівняння окремих режимів, тобто для оцінки їх динамічних властивостей, вводять поняття “повний час розгону (t_p)”.

Визначають по кривій розгону (рис.267), яку отримують, якщо на вхід об'єкта скачком подати вхідну величину і записати зміну в часі керованої величини $y=f(t)$, при скачкоподібній зміні зовнішньої дії $F(t)$. Для кожного об'єкта t_p має різний зміст. Для нагрівача – це час необхідний, щоб в нагрівачі встановилась задана температура після його підключення.

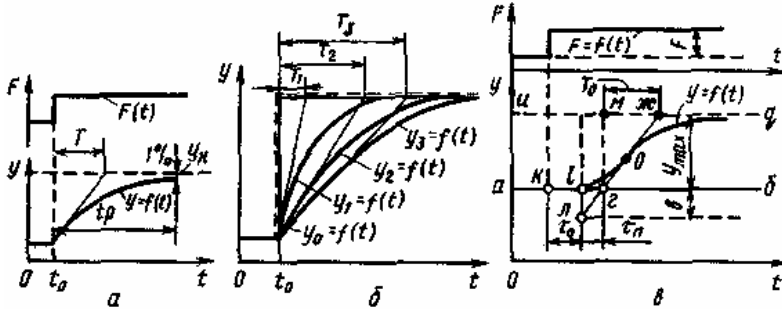


Рис. 267. Криві розгону об'єкті:

*а – графічне визначення постійної часу і часу регулювання;
 б – визначення постійних часу об'єктів; в – визначення динамічних властивостей об'єкта*

Час розгону об'єкта при відсутності самовирівнювання називають сталою часу T .

Зв'язок між T і t_p : $T=1/v\rho$; $t_p=4,6T$,

де v – чутливість об'єкта;

ρ – коефіцієнт самовирівнювання $\rho = \frac{\partial \Delta F}{\partial \sigma}$,

де $\Delta F = \frac{F_1 - F_2}{F_H}$ – пристрій зовнішньої дії;

$\sigma = u/u_n$ – керуюча величина у відносних одиницях.

Для об'єктів безземнісних $T=0$.

По кривих розгону об'єкта визначають час запізнення τ , коефіцієнт самовирівнювання ρ , зміну керованої величини, швидкість цієї зміни, постійну часу об'єкта T_0 , час регулювання (рис. 267).

2. Функції регулятора. Класифікація регуляторів. Пристрій системи автоматичного регулювання (САР), що підключається до керованого об'єкта і служить для підтримання керованої величини на заданому рівні або зміна її відповідно з потрібним законом регулювання називають автоматичним регулятором (АР).

Головна функція регулятора полягає в тому, щоб визначити відхилення керованої величини від заданого значення, підсилити це відхилення при потребі та перетворити в переміщення виконавчого

механізму або в керуючий сигнал регулюючого органа об'єкта керування.

Оскільки існує багато технологічних процесів в різних галузях господарства країни, а автоматизуються всі процеси, то випускають різні регулятори, що відрізняються один від одного множиною признаков.

Розглянемо класифікацію АР з точки зору їх практичного використання.

За видом регульованого параметра: регулятори температури, тиску, рівня тощо. За енергетичними ознаками: регулятори прямої і непрямой дії.

В АР прямої дії як джерело живлення для його роботи використовують частину енергії керованого об'єкта. В АР непрямой дії для їх роботи використовується стороння енергія, і від її виду регулятори бувають електричні, пневматичні, гідравлічні, комбіновані тощо.

За конструктивними ознаками: апаратні, приладні, агрегатні, модульні. Регулятори апаратного типу виробляють тільки керуючий сигнал. Він складається з вимірювального блоку і електричного пристрою, що формує закон керування. Приладні регулятори включають вимірювальний пристрій, який одночасно формує сигнал на вимірювальний прилад, реєструючий значення контрольованої величини і сигнал керування. Регулятори агрегатного типу – перетворювально-підсилювальний блок, що зрівнює сигнал датчика і задане значення, формуючи вихідний сигнал. Модульні регулятори складаються з окремих модулів, з яких можна зібрати АР з потрібними функціями.

За алгоритмом керування регулятори бувають статичні, астатичні, програмні, слідкуючі. Крім того є регулятори неперервної дії, релейні та імпульсні. За законами керування розрізняють регулятори пропорційні, інтегральні, пропорційно-інтегральні, пропорційно-диференціальні, пропорційно-інтегрально-диференціальні.

3. Статичні й астатичні регулятори. За видом залежності між значенням регульованого параметра і величиною зовнішньої дії (навантаження) на об'єкт регулювання розрізняють статичне і астатичне регулювання. Статичним називається таке регулювання, за якого в установленому режимі є певна залежність між величиною відхилення регульованого параметра від заданого значення і величиною збуджуючої дії.

У статичних регуляторах величина регульованої дії однозначно пов'язана з відхиленням регульованого параметра від заданого значення. Таким чином, для створення потрібної регулюючої дії, що усуває відповідний вплив зовнішнього збурення, обов'язково повинно мати місце відхилення регульованого параметра.

У статичних АСР різним збурюючим діям відповідають різні значення регульованого параметра, а значить різні стани рівноваги в усталеному режимі. Кожному новому значенню збурюючої дії відповідає новий стан рівноваги при іншому значенні відхилення регульованого параметра в усталеному режимі.

Прикладом простого статичного регулятора може бути автоматичний регулятор рівня води в баці (рис. 268).

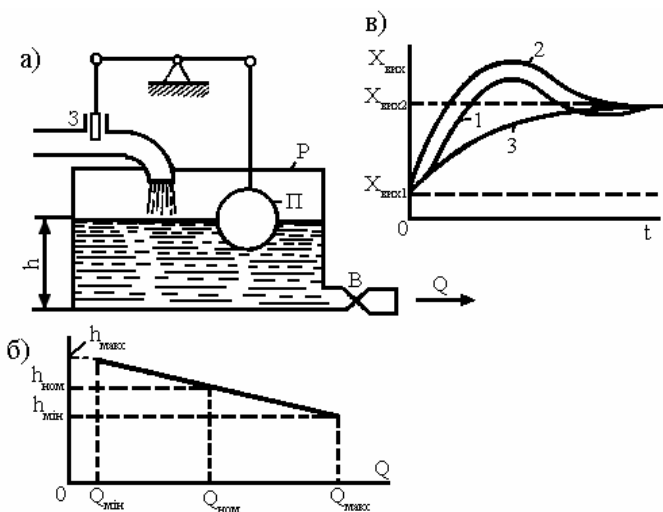


Рис. 268. Статичний регулятор рівня рідини:

а – конструктивна схема; б – залежність тиску від витрати рідини; в – перехідний процес в статичних регуляторах

У схемі поплавков Π , що контролює рівень води h в баці, зв'язаний механічно з заслонкою З , що регулює приплив води в бак. Якщо приплив рівний витоку води Q , який залежить від положення вентилля В , то в системі встановлюється рівновага і підтримується певний постійний рівень h води. При зміні положення вентилля В , зміниться Q , то для відновлення стану рівноваги необхідно відповідно

змінити приплив, отже змінити положення заслонки З, поплавка П, від якого залежить рівень рідини Н. При зміні витoku води від $Q_{\text{мін}}$ до $Q_{\text{макс}}$ регульований параметр h зміниться від $h_{\text{макс}}$ до $h_{\text{мін}}$, що видно з графіка. Номінальне значення регульованого параметра

$h_{\text{ном}} = \frac{h_{\text{макс}} + h_{\text{мін}}}{2}$. При $h = h_{\text{ном}}$ похибка при регулюванні відсутня.

В інших випадках має місце абсолютна статична похибка $\Delta h = h - h_{\text{ном}}$ та відносна статична похибка $dh = \frac{\Delta h}{h_{\text{ном}}} \times 100\%$, а вираз

$\frac{h_{\text{макс}} + h_{\text{мін}}}{2} = S$ називають коефіцієнтом нерівномірності або

статизмом системи регулювання.

Астатичним називають таке регулювання, за якого в установленому режимі відхилення регульованого параметра від заданого значення рівна нулю за будь-якого значення збуджуючої дії. Рівновага в системі встановлюється лише при єдиному заданому значенні регульованого параметра.

В установленому режимі при постійному значенні збуджуючої дії незмінним повинно бути також і регульована дія, тобто швидкість його зміни повинна бути рівна нулю, що можливо лише при відсутності відхилення регульованого параметра від його номінального значення.

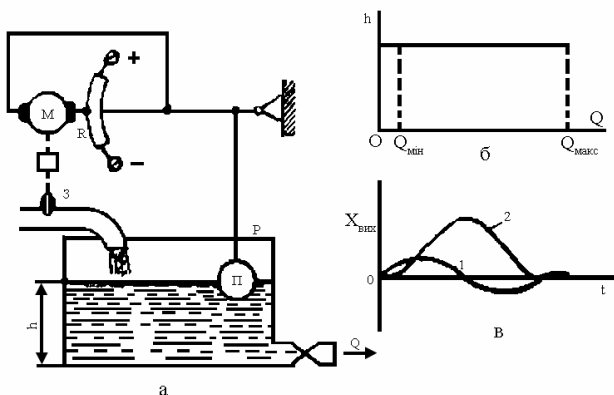


Рис. 269. Астатичний регулятор рівня рідини:
а – конструктивна схема; б – залежність тиску від витрат рідини; в – перехідний процес регулятора

Розглянемо роботу астатичного регулятора рівня води в баці (рис.269). У схемі поплавок П, механічно пов'язаний з рухомим контактом потенціометра R, через який живиться якор двигуна М, що через редуктор може переміщувати заслонку З. У такому регуляторі постійне значення припливу води в бак, відповідне її витoku Q, можливе тільки при нерухомому якорі і заслонці З. Але для цього рухомий контакт потенціометра повинен бути посередині, що можливо лише при єдиному значенні h води, контрольованій поплавком П. Отже, в установленому режимі будь-якому значенні Q відповідає єдине значення $h_{ном}$, що видно з графіків (рис.269, б).

4. Регулятори пропорційної дії (П-регулятори). У П-регуляторах переміщення регульованого органа X_p пропорційне до відхилення регульованої величини від заданого її значення

$$X_p = k_p u,$$

де k_p – коефіцієнт передачі регулятора, який рівний переміщенню регульованого органа при відхиленні регульованої величини на одиницю її вимірювання.

Як видно з рівняння, П-регулятор за своїми динамічними характеристиками є пропорційною ланкою.

У регуляторі кожному значенню регульованого параметра відповідає певне положення регульованого органу, тому стан рівноваги регулятора можливий при різних значеннях контрольованого параметра, він не підтримується на заданому рівні. Різниця між максимальним і мінімальним усталеним значенням контрольованого параметра називається абсолютною нерівномірністю, тому П-регулятори звать статичними. Вони забезпечують стійке регулювання, але мають значну статичну похибку, що обмежує сферу їх застосування, оскільки для багатьох об'єктів крім високої якості перехідного процесу потрібна висока статична точність регулювання.

Крім електричної схеми регулятора (рис.270) розглянемо механічну схему П-регулятора тиску непрямої дії.

Основні елементи регулятора – мембранний чутливий елемент, золотниковий підсилювач, гідравлічний сервопривід з регульованим клапаном. Правий кінець важеля 4 пов'язаний з штоком поршня 7 серводвигуна 6. Тому переміщення правого кінця важеля 4 рівне переміщенню заслонки 8 регульованого клапана, передається золотнику 5. Це додаткове переміщення золотника пропорційне переміщенню заслонки 8.

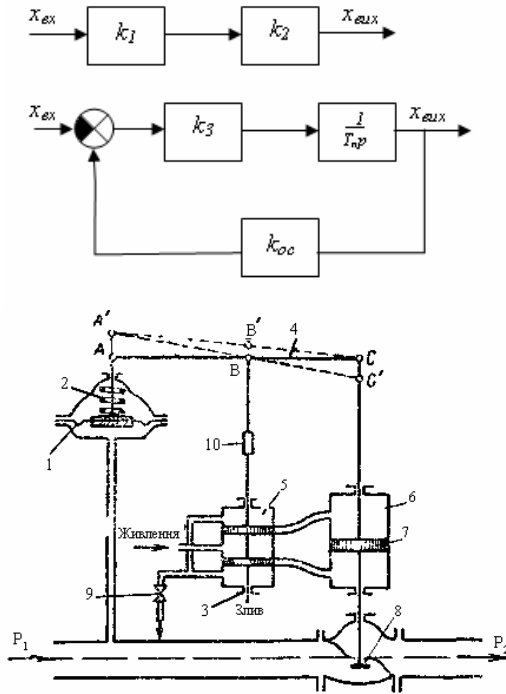


Рис. 270. Механічна схема П-регулятора тиску непрямої дії
а – структурні схеми П-регуляторів; б – схема П-регулятора тиску:
 1 – вісь, 2 – пружина, 3 – зливний клапан, 4 – важіль, 5 – золотник,
 6 – серводвигун, 7 – поршень, 8 – заслонки

Діє регулятор так: під час збільшення регульованого тиску P_1 мембрана прогинається вгору і точка А важеля 4 переміщується в точку A' , а точка С важеля 4 в першу мить не змінює свого положення. При цьому плунжер золотника 5 зміститься вгору і масло під тиском буде подаватися в порожнину над поршнем 7, який почне рухатися вниз і заслонка 8 збільшить прохідний отвір регульованого клапана. Дія жорсткого зворотного зв'язку проявляється в тому, що разом з поршнем 7 рухається вниз і точка С важеля 4, повертаючи золотник 5 в середнє положення. Так що положення золотника і переміщення заслонки регульованого органу визначається не тільки величиною відхилення регульованого параметра (прогин мембрани), але і

положенням заслінки регульованого органу. Процес регулювання закінчиться, коли золотник займе знову середнє положення (точка В' вернеться в положення В) і важель 4 займе положення А'В'С'. В результаті має місце залишкове відхилення керованої величини, пропорційне відрізку АА'. У кінці регулювання точка В вернеться на місце, а мембрана і затвор будуть у нових положеннях. Величина регульованого параметра задається зміною натягу пружини 2, або довжини штока золотника 5.

Одну із практичних схем П-регулятора температури в тваринницькому приміщенні наведено на рис. 271,б.

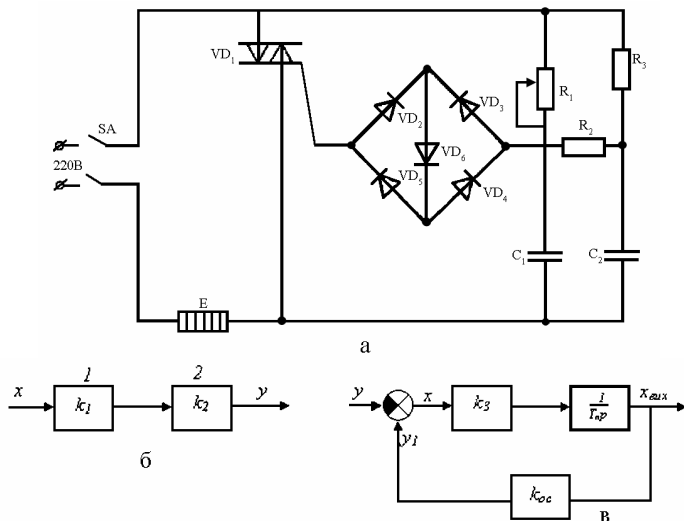


Рис. 271. Схема П-регулятора температури

(а – принципова електрична схема П-регулятора температури;
 б – структурна схема; в – те ж але з від'ємним зворотним зв'язком)

У регуляторі регулюючим органом є симістор VS1. На відміну від регулятора РТБ-2 в ньому замість блока підсилювачів і терморезистора використаний сильфонний датчик температури, механічно пов'язаний із змінним резистором, ввімкненого в коло керування симістора так, що при коливанні температури стикається чи розтискається сильфон, змінюючи опір резистора, а значить і струм керування симістора. Останній змінює напругу на нагрівачі Е (при зниженні температури в приміщенні симістор відкривається більше,

збільшуючи струм нагрівача і, навпаки, при підвищенні температури в приміщенні симістор прикривається, зменшуючи потужність нагрівача). П-регулятор відносно простий, дешевий, але має невелику точність підтримання температури.

5. Регулятори інтегральної дії (І-регулятори). Інтегральний регулятор реалізує інтегральний закон керування і характерний тим, що при відхиленні регульованого (контрольованого) параметра від заданого значення (завдання регулятора) регульований орган буде переміщуватися до моменту, поки регульований параметр не досягне заданого значення.

У динамічному відношенні І-регулятор – це інтегруюча ланка, тому структурна схема його складена в основному з послідовно ввімкнених підсилювальної та інтегруючої ланки (гідравлічний сервопривід, електродвигун постійного струму тощо). Параметром наладки І-регулятора є постійна часу інтегрування T_i .

У цих регуляторах переміщення регульованого органу пропорційне інтегралу від відхилення керованої величини, тобто $x_p = k_{p1} \int u dt$

або $\frac{dx_p}{dt} = k_{p1} u$ – переміщення регульованого органу відбувається із швидкістю, пропорційною до відхилення регульованої величини від заданого значення. Коефіцієнтом пропорційності називається приведеною швидкістю регулювання і рівний швидкості переміщення регульованого органу при відхиленні регульованої величини на одиницю її вимірювання. І-регулятор стійко працює на об'єктах з великим самовирівнюванням. Бажано, щоб T_i (час переміщення регульованого органу з одного крайнього положення в інше при максимальному відхиленні керованої величини від заданої) був невеликий для збільшення швидкості переміщення регульованого органу.

Розгляньте нижчеподані схеми.

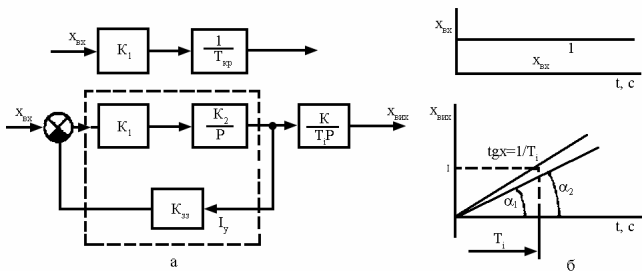


Рис. 272. Структурна схема (а) і перехідні процеси (б) І-регулятора

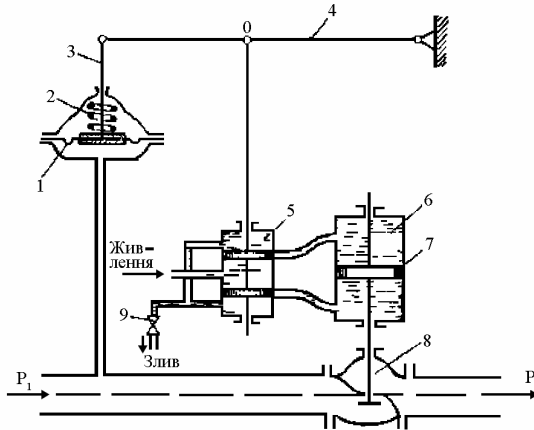


Рис. 273. Схема I-регулятора тиску:

1 – мембрана; 2 – пружина; 3 – шток; 4 – важіль; 5 – золотник;
6 – серводвигун; 7 – поршень; 8 – затвор; 9 – дросель

Тиск у трубі передається на чутливий елемент – мембрану 1, прогин якої пропорційний до відхилення тиску від заданого значення, передається штоком 3 на важіль 4, зв'язаний з золотниковим підсилювачем 5, який керує подачею масла від насоса в порожнину гідравлічного серводвигуна 6. При відхиленні золотника від середнього (нейтрального) положення, а це буває при зміні регульованого тиску P_1 , масло починає надходити у відповідну порожнину серводвигуна, переміщуючи його поршень 7 та засувку 8 регульованого клапана. Одночасно з другої порожнини серводвигуна масло зливається через дросель 9. Переміщення засувки регульованого клапана припиняється, коли золотник 5 знову займе нейтральне положення, перекриваючи рух масла в серводвигун. Це можливо тільки за умови, коли регульований параметр (тиск) буде рівний заданому, а мембрана 1 і важіль 4 займуть вихідне положення. Заслонка регульованого клапана займе нове положення відповідно до нового значення витрати (отже, відсутня певна залежність між значенням керованої величини та положенням заслонки регульованого клапана). Змінити час T_i можна дроселем 9, а заданий тиск встановити натягом пружини 2. Регулятор підтримує задане значення керованої величини незалежно від зміни навантаження об'єкта, але дещо інертно.

6. Регулятори пропорційно-інтегральної дії (ПІ-регулятори).

ПІ-регулятор (або ізодромний) реалізує закон керування ПІ, і, як видно з назви його, поєднує в собі властивості пропорційного та інтегрального регуляторів. Працює без статичної похибки, а переміщення регульованого органа пропорційне сумі відхилень регульованої величини:

$$x_p = k_p y + k_{pI} \int y dt = k_p \left(y + \frac{1}{T_i} \int y dt \right), \quad (306)$$

де k_p – коефіцієнт передачі регулятора;

$T_i = k_p / k_{pI}$ – час ізодрому, що характеризує ступінь впливу інтеграла на закон регулювання.

Привівши рівняння до виду $\frac{dx_p}{dt} = k_p \left(\frac{dy}{dt} + \frac{1}{T_i} y \right)$, можна зробити

висновок, що швидкість переміщення регульованого органа пропорційна до відхилення і швидкості зміни регульованої величини. Якщо в системі автоматики з ПІ-регулятором порушиться рівновага, то в роботу включиться його статична і астатична складові. При цьому статична складова буде прагнути зупинити зміну керованої величини при одночасній дії астатичної складової. Коли регульована (керована) величина досягне попереднього значення, пропорційна складова регулятора припинить свої дії на регульований орган (статична похибка не перевищує допустиме значення), а астатична – буде працювати до тих пір, поки статична похибка стане рівною нулю (керована величина рівна заданій). Так що на початку перехідного процесу ПІ-регулятор працює як пропорційний, а в кінці процесу – як інтегральний.

Ці регулятори налагоджують за двома параметрами: k_p і T_i , а його структурну схему складають дві ланки: пропорційна та інтегральна, ввімкнені паралельно. Як видно з формул, при $T_i \rightarrow \infty$, $k_p \rightarrow 0$ і ПІ-регулятор перетворюється в П-регулятор, а якщо k_p / T_i стане (при k_p і T_i досить малі), ПІ-регулятор перетвориться в І-регулятор. На рис.274 наведені структурні і принципові схеми ПІ – регулятора.

Схема гідравлічного ПІ-регулятора відрізняється від гідравлічного П-регулятора тиску наявністю механізму гнучкого зворотного зв'язку – ізодрома, що складається з циліндра 11, заповненого маслом, порожнина якою по обидві сторони поршня 10 з'єднані через регульований дросель 9, та пружини 12. Переміщенню поршня 10 в циліндрі 11 перешкоджає сила тertia масла, тому поршень

переміщується повільно залежно від сили, що діє на нього та від ступеня відкриття дроселя 9.

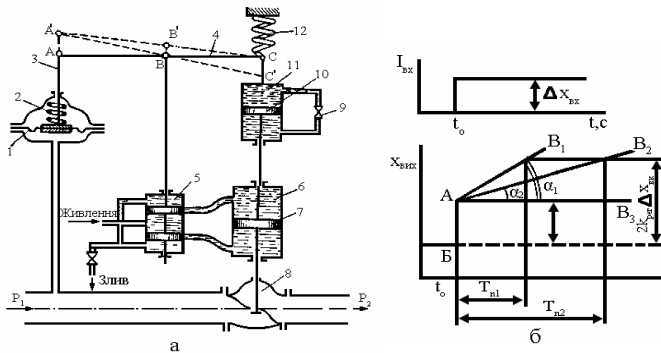


Рис. 274. Схема ПІ-регулятора тиску рідини (а) та часові характеристики регулятора (б)

Працює регулятор так: нехай в результаті зростання регульованого тиску P_1 вимірювальна мембрана прогнеться вгору, перемістивши важіль 4 у положення $A' B' C'$. плунжер заслінки 5 також перемістившись, направить масло під тиском у верхню порожнину серводвигуна 6. Поршень 7 переміститься вниз, відкриваючи засувку 8 регульованого клапана. Одночасно з поршнем серводвигуна переміститься вниз поршень 10 механізму ізодрома.

Оскільки масло в циліндрі 11 не встигає протікати через малий отвір дроселя 9, разом з поршнем 10 переміщується вниз кінець важеля 4 (точка С) зворотного зв'язку, розтягуючи пружину 12. Збільшена сила пружини спричинить зворотний рух плунжера заслінки 5 в його середнє положення (важіль 4 в положенні $A' B' C'$) і виключення серводвигуна. Засувка 8 регульованого клапана займе нове значення, відміне від заданого (правий кінець важеля 4 в точці С).

На початку процесу регулювання ПІ-регулятор аналогічний дії П-регулятора. Після відключення серводвигуна, регулятор продовжує працювати за рахунок сили розтягнутої пружини 12, яка перемістить циліндр 11 вгору з швидкістю, що залежить, в свою чергу, від швидкості перетікання масла з нижньої порожнини у верхню через дросель 9. При переміщенні циліндра 11 і точки С' вгору, ричаг 4, повертаючись навкруги точки А' (поршні 7 і 10 нерухомі), підніме плунжер золотника 5, переміщуючи додатково засувку 8 регульованого клапана вниз, зменшуючи тиск P_1 , а значить і залишкове відхилення

AA'. Дія регулятора буде доти, поки не стиснеться пружина 12 і тиск P_1 не стане рівним заданому (засувка 8 займе нове положення відповідно до нового витoku рідини, газу тощо). Так що III регулятор спочатку працює як пропорційний, а в кінці як інтегральний, забезпечуючи швидке затухання коливань керованого параметра і усування статичної похибки. У них не має жорсткого зв'язку між відхиленням регульованого параметра і положенням заслонки регульованого органу, тому їх називають регуляторами з гнучким (пружинним) зворотним зв'язком.

На характеристиках III-регулятора $x_{вх}=f(t)$, $x_{вих}=f(t)$ видно, що при різкій зміні регульованого параметра в момент часу t_0 затвор регульованого органу швидко переміститься на величину $K_{рег} \cdot \Delta x_{вх}$ (відрізок БА) під дією пропорційної величини.

Під дією інтегральної складової затвор регульовального органу продовжуватиме переміщуватися в тому ж напрямку (лінія АВ) з постійною швидкістю (швидкість ізодрома).

Налагодження часу ізодрома T_i в регуляторі тиску встановлюють зміною величини відкриття дроселя 9 (більше відкритий дросель, менший час T_i , крутіше АВ). Якщо дросель відкритий повністю, то $T_i \rightarrow 0$ і III, регулятор стає I регулятором, а коли дросель закритий $T_i \rightarrow \infty$ і III-регулятор стає II-регулятором (пряма АВ₂).

Такі регулятори застосовують для різних об'єктів керування, коли необхідна висока точність регулювання при значних коливаннях великих навантажень.

Контрольні питання

1. Привести приклади сільськогосподарських об'єктів керування.
2. Пояснити статичну характеристику об'єкта.
3. Назвати основні характеристики керованого об'єкта.
4. Пояснити призначення автоматичного регулятора.
5. У чому суть регуляторів прямої і непрямої дії
6. Пояснити роботу статичних регуляторів.
7. Як працює астатичний регулятор?
8. Застосування, принцип дії пропорційного регулятора?
9. Як працює механічний пропорційний регулятор тиску непрямої дії?
10. Призначення, робота регуляторів інтегральної дії.
11. Пояснити роботу механічного інтегрального регулятора тиску.
12. Яке призначення та робота III-регулятора?

2.15. ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧІ ПРИСТРОЇ

1. Способи вводу і виводу інформації.
2. Принцип дії електронно-обчислювальних машин.

1. Способи вводу і виводу інформації. В різні часи вчені створювали обчислювальні механізми для виконання математичних розрахунків. Але вони були громіздкі, досить інертні, обмежені в застосуванні (рахівниці, арифмометри тощо). Швидкий розвиток електроніки прискорив розвиток сучасніших обчислювальних машин спочатку на електричних реле, електронних лампах, напівпровідникових приладах, пізніше – на напівпровідникових інтегральних мікросхемах. Сучасна ЕОМ складається з окремих блоків – системний блок, пристрій вводу-виводу інформації, периферійні пристрої (принтери, сканери, дисководи тощо).

Узагалі розрізняють дві групи ЕОМ: цифрові та аналогові. Цифрові ЕОМ оперують дискретними (імпульсними) величинами, а в аналогових машинах електричні сигнали змінюються в часі безперервно за величиною. Отже, більше уваги приділимо цифровим ЕОМ, що автоматично перетворюють інформацію згідно з розробленою програмою. В основі математичного запису роботи ЕОМ застосовують прості положення алгебри логіки (булевої алгебри). У булевій алгебрі змінні, і функції можуть приймати два значення: “0”, і “1”, над якими ведуть три основних дії: логічне складання, логічне множення, логічне заперечення. У свою чергу з цих простих логічних функцій утворюють більш складні (І-НІ, АБО-НІ тощо). В ЕОМ для записування інформації використовується позиційна двійкова система числення, тобто всі операції виконуються із застосуванням цифр “1” і “0”. У цій системі за основу беруть число “2”, а в десятковій – число 10. Ця система дає можливість записати будь-яке число з допомогою цифр “0”, “1” чи закодувати букви, символи та ін. Система досить проста, операції над двійковими числами виконуються порозрядно, хоча запис великих чисел громіздкий, що є недоліком цієї системи. Тому в ЕОМ застосовують системи числення з основою 8, 16, так як $8=2^3$, а $16=2^4$ і запис інформації значно спрощується.

Пристрої вводу, виводу інформації відносяться до периферійних пристроїв ЕОМ і виконують функції зв'язку між людиною і машиною. Через пристрій вводу команди надходять у пам'ять машини, а результати обчислень, переробки інформації у зручному для практичного використання вигляді надходять у пристрій виводу. У різних ЕОМ

застосовують різного роду пристрої вводу. До них належать перфокarti, перфоленти, магнітні лампи, алфавітно-цифрові друкарські пристрої, електричні друкарські машини, електричні пристрої відображення інформації – дисплеї.

Основні вимоги до пристроїв вводу – надійність, експлуатаційні зручності, швидкість роботи.

Клавішні пристрої вводу – найбільш прості і поширені пристрої для вводу даних у ЕОМ. Відомі клавішні пристрої трьох типів: проста клавіатура для вводу чисел; клавіатура для вводу повного набору букв, цифр, інших символів; спеціальна клавіатура.

Проста клавіатура останнім часом застосовується в калькуляторах.

Клавіатура другого типу дає можливість ввести всі букви, цифри і до 30 спеціальних символів. Спеціальна клавіатура застосовується при вводі графічної інформації, спеціальних команд.

Більшість клавіатур побудовано за одним принципом (рис.275).

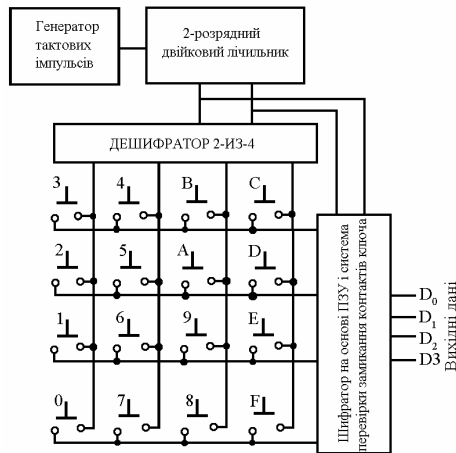


Рис. 275. Схема простої клавіатури

На рисунку показано матрицю з вертикальними і горизонтальними лініями, зв'язані між собою кнопками клавіатури (показано 16 кнопок від О до F).

Горизонтальні лінії матриці пов'язані з системою кодування, що виконує дві функції: кілька разів послідовно перевіряють замикання клавiш з метою захисту від помилкових спрацювань клавіатури;

виконує кодування вихідних даних (система сприймає інформацію, що надходить на вертикальні і горизонтальні лінії матриці клавіатури і утворює необхідні сигнали, які можна подати в паралельні чи послідовні форми).

Клавіатура алфавітно-цифрових друкарських пристроїв, перфаторів містить букви латинського, російського алфавіту, цифри, різні символи. Клавіші з'єднані з пуансонами. Кожний з клавішних символів кодується набором отворів згідно з кодом.

Перфокарти виготовляють з карток з отворами. Інформація у вигляді пробивок-отворів відповідає одиниці, відсутність пробивки – 0. Кожній цифрі, букві, символу відповідає певна комбінація пробивок. Інформація на карті розміщується в тій послідовності, в якій вона повинна бути записана в оперативний запам'ятовуючий пристрій.

Електричні друкарські машини мають клавішний механізм з електромагнітами, блок керування, дешифратор. Вони використовуються для безпосереднього вводу даних в ЕОМ з клавіатури і виводу даних на друкарський пристрій.

Дисплеї, що можуть входити в склад ЕОМ, мають електричний блок керування, клавіатуру, запам'ятовуючий пристрій тощо. Відображення інформації ведеться за сигналами блоку керування з допомогою клавіатури дисплея; можна виконувати редагування, витирання даних, брати з ЕОМ нову інформацію тощо.

Отже, дисплей є універсальним пристроєм вводу-виводу інформації, що дає можливість оператору вести діалог з ЕОМ. Виготовляється як автономний функціональний пристрій, що має алфавітно-цифрову клавіатуру, пам'ять для забезпечення зберігання інформації, блок керування для виконання всіх функцій.

Дисплей з асинхронним телеграфним блоком може автономно керувати друкарським пристроєм (електричною друкарською машиною), що дає можливість реєструвати інформацію екрана на папері.

Сучасна клавіатура на 104/105 клавіш, крім функцій вводу інформації, виконує функції керування ЕОМ. Запам'ятовуючі пристрої ЕОМ забезпечують зберігання, прийом, передачу різної інформації. Вони повинні бути швидкодіючі з великою інформаційною ємністю. Розрізняють пам'ять ЕОМ оперативну, постійну, зовнішню, буферну, що реалізується в основному на великих інтегральних мікросхемах.

Різниця між оперативною і постійною пам'яттю: оперативна пам'ять використовується тільки в процесі роботи ЕОМ і зникає при відключенні його. Швидкість доступу до оперативної пам'яті 7÷8 наковесекунд, а до постійної – 8÷10 мікросекунд. Різниця очевидна – сотні

тисяч раз. Оперативна пам'ять випускається у вигляді мікросхем на польових транзисторах (модулі пам'яті). Кожний модуль пам'яті може вміщувати від 1 до 128 Мбайт інформації (8 біт складає 1 байт).

Зовнішня оперативна пам'ять має велику інформаційну ємність і може довгий час зберігати інформацію на магнітних стрічках, барабанах, дисках тощо (величина ємності – кілька гігабайт).

Буферна пам'ять (кеш-пам'ять) має невелику інформаційну ємність, в яку розміщують найнеобхіднішу, що часто використовується, інформацію. Вона також узгоджує різні рівні системи пам'яті між собою і зовнішніх пристроїв з системою пам'яті. Цей пристрій виконує арифметичні, логічні та інші операції.

До арифметичних операцій у двійковій системі належать додавання, віднімання, ділення, множення та ін.; логічні операції – зсув чисел. Їх порівняння, нормалізація та й ін.; операції із взаємодією оперативно-запам'ятовуючого пристрою (ОЗП) з суматором та зовнішнім запам'ятовуючим пристроєм тощо.

Арифметично-логічні пристрої (АЛП) класифікують по багатьох ознаках: АЛП послідовної та паралельної дії, за способом запису, відображення чисел тощо.

Пристрій керування автоматично виконує програму обчислень, введених у машину, складається з генератора керуючих сигналів, лічильника команд, регістра команд, комутатора адерсів та інших елементів. Пристрій керування виробляє згідно з програмою необхідну послідовність функціональних сигналів, які забезпечують взаємодію частин ЕОМ так, щоб весь процес обчислень був автоматичним. Пристрій подає сигнали на введення та виведення даних, командної інформації в запам'ятовуючий пристрій та із оперативного запам'ятовуючого пристрою в АЛП. Крім того пристрій керування забезпечує контроль операцій, що виконуються і запускає, зупиняє машину.

Арифметично-логічний пристрій, пристрій керування, блок оперативної пам'яті, селекторні та мльтиплексійні канали складають процесор ЕОМ (рис.276).

Процесор розміщується в системному блоці на спеціальній платі, яку називають матрицею. На ній пов'язують між собою всі пристрої ЕОМ, координують їх дії, передачі сигналів між ними з допомогою шин.

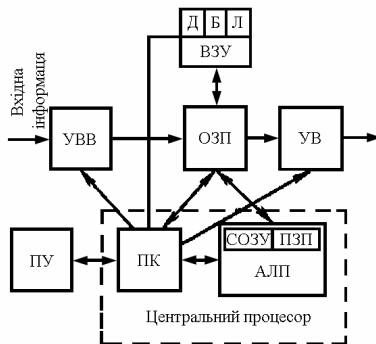


Рис.276. Будова ЕОМ і взаємодія її частин

2. Принцип дії ЕОМ. ЕОМ можна запрограмувати для виконання складних алгоритмів і обробки значних об'єктів інформації. Але під час виконання цих алгоритмів ЕОМ виконує велику кількість простих кроків; за один крок ЕОМ виконує тільки одну команду над елементарними порціями інформації – бітами, байтами, словами.

Значна кількість ЕОМ служить для вирішення практичних завдань певного класу. Машина автоматично виконує послідовність операцій над даними програмами згідно з алгоритмом розв'язання завдання. Програма – це точна послідовність команд, команда – точна вказівка машині на пересилання чисел з комірок пам'яті, виконання над ними певних дій і занесення результату знову в пам'ять або пристрій виводу інформації (дисплей, принтер). При цьому в команду заносять інформацію про вид операції, даних, що беруть участь у цій операції, адреси комірок цих даних. Частина команди, що складається з даних та їх адрес, називають операндом. Програма для вирішення цього завдання знаходиться в її оперативній пам'яті як результат завантаження ЕОМ.

Складання програми ведеться по-різному для кожної конкретної ЕОМ, використовуючи керування інформації, символічне записування її на спеціальних бланках. Потім інформація переноситься на перфокарти, перфострічки та ін. При цьому кожна буква, цифра, символ програми відповідно перетворюється в серію отворів і з допомогою пристрою вводу інформації програма вводиться в комірки оперативної пам'яті згідно з адресою. У подальшому процес рішення зводиться до послідовного виконання машиною команд програми. За сигналами пристрою керування команди пересилаються з оперативної

пам'яті в АЛП процесора, де операнди команд обробляють: складають, віднімають, зрівнюють тощо і результати пересилають знову в пам'ять. Результати обрахунків за спеціальними командами програми виводяться на принтер (друкуючий пристрій), чи екран монітора тощо у вигляді, зручному для подальшого практичного використання.

Контрольні запитання

1. Які ЕОМ називають цифровими?
2. У чому різниця цифрових ЕОМ від аналогових?
3. Чому в булевій алгебрі застосовують значення функцій, змінних як 1 або 0?
4. Назвіть основні логічні функції.
5. Які способи вводу інформації в ЕОМ?
6. Які способи виводу інформації з ЕОМ?
7. З яких основних блоків складається ЕОМ?
8. Яку пам'ять ЕОМ звать оперативною?
9. На яких електронних елементах будують оперативну пам'ять?
10. Яку пам'ять ЕОМ звать постійною?
11. На яких елементах будують постійну пам'ять?
12. Що розуміють під буферною пам'яттю?
13. Які функції виконує арифметично-логічний пристрій?
14. Що розуміють під тактовою частотою ЕОМ?
15. Які функції процесора?

Одиниці міжнародної системи (SI)

Найменування величини	Одиниця		
	назва	українське	міжнародне
1	2	3	4
Основні одиниці			
Довжина	метр	м	m
Маса	кілограм	кг	kg
Час	секунда	с	s
Сила електричного струму	ампер	А	A
Термодинамічна температура	кельвін	К	K
Кількість речовини	моль	моль	mol
Сила світла	кандела	кд	cd
Додаткові одиниці			
Плоский кут	радіан	рад	rad
Тілесний кут	стерадіан	ср	sr
Похідні одиниці електричних і магнітних величин			
Густина електричного струму	ампер на квадратний метр	А/м ²	A/m ²
Кількість електрики, електричний заряд	кулон	Кл	C
Поверхнева густина електричного заряду	кулон на квадратний метр	Кл/м ²	C/m ²
Електрична напруга, електричний потенціал, різниця електричних потенціалів	вольт	В	V
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	V/m
Електрична ємність	фарад	Ф	F
Абсолютна діелектрична проникність	фарад на метр	Ф/м	F/m
Електричний опір	Ом	Ом	Ω
Питомий електричний опір	Ом-метр	Ом·м	Ω·m
Електрична провідність	сименс	См	S
Питома електрична провідність	сименс на метр	См/м	S/m
Магнітний потік	вебер	Вб	Wb

1	2	3	4
Магнітна індукція	тесла	Тл	Т
Індуктивність, взаємна індуктивність	генрі	Гн	Н
Абсолютна магнітна проникність, магнітна стала	генрі на метр	Гн/м	Н/м
Намагніченість, напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	А/м
Магніторушійна сила	ампер	А	А
Магнітний опір	ампер на вебер	А/Вб	А/Вб
Магнітна провідність	вебер на ампер	Вб/А	Вб/А
Електромагнітна енергія	джоуль	Дж	Дж
Активна потужність	ват	Вт	Вт
Реактивна потужність	вар	вар	вар
Повна потужність	вольт-ампер	В·А	В·А

Додаток 2

Питомий електричний опір напівпровідників і діелектриків

Речовина	Температура, С ⁰	Питомий опір, Ом·м
<i>Напівпровідники</i>		
Антимоніт індію	17	$5,8 \cdot 10^{-5}$
Бор	27	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Германій	27	0,47
Кремній	27	$2,3 \cdot 10^8$
Селенід свинцю	20	$9,1 \cdot 10^{-6}$
Сульфід свинцю	20	$1,7 \cdot 10^{-5}$
<i>Діелектрики</i>		
Вода дистильована	20	$10^3 \dots 10^4$
Повітря	0	$10^{15} \dots 10^{18}$
Деревина суха	20	$10^9 \dots 10^{10}$
Кварц	230	10^9
Масло трансформаторне	20	$10^{10} \dots 10^{13}$
Парафін	20	10^{14}
Гума	20	$10^{11} \dots 10^{12}$
Слюда	20	$10^{11} \dots 10^{15}$
Скло	20	$10^9 \dots 10^{13}$

**Множники і префікси для утворення
кратних і часткових одиниць**

Множник	Назва префікса	Позначення		Назва множника
		українське	міжнародне	
10^{18}	екса	е	E	Квінтільйон
10^{15}	пета	П	P	Квадрільйон
10^{12}	тера	Т	T	Трильйон
10^9	гіга	Г	G	Мільярд
10^6	мега	М	M	Мільйон
10^3	кіло	к	k	Тисяча
10^2	гекто	г	h	Сто
10^1	дека	да	da	Десять
10^{-1}	деци	д	d	Одна десята
10^{-2}	санти	с	c	Одна сота
10^{-3}	мілі	м	m	Одна тисячна
10^{-6}	мікро	мк	μ	Одна мільйонна
10^{-9}	нано	н	n	Одна мільярдна
10^{-12}	піко	п	p	Одна трильйонна
10^{-15}	фемто	ф	f	Одна квадрилльйонна
10^{-18}	ато	а	a	Одна квінтільйонна

Питомий електричний опір провідників при $t = 20^{\circ}\text{C}$

Матеріал провідника	Питомий опір, мкОм·м	Матеріал провідника	Питомий опір, мкОм·м
Алюміній	0,028	Свинець	0,21
Вольфрам	0,055	Срібло	0,016
Графіт	13	Сталь	0,1...0,14
Дюралюміній	0,033	Цинк	0,061
Залізо	0,10	Чавун	0,5...0,8
Золото	0,022	Константан	0,5
Латунь	0,07...0,08	Конель	0,47
Магній	0,045	Манганін	0,43
Мідь	0,017	Нейзильбер	0,3
Нікель	0,073	Нікелін	0,4
Олово	0,12	Ніхром	1,1
Платина	0,10	Фехраль	1,3
Ртуть	0,96		

ЛІТЕРАТУРА

1. Барабанов В.Е., Василевский В.И., Левин С.М. Электрооборудование тракторов и автомобилей. – М.: Колос, 1974.
2. Бечева М.К., Златенов И.Д., Новиков П.Н., Шапкин Е.В. Электротехника и электроника. – М.: Высшая школа, 1991.
3. Бородин И.Ф. Технические средства автоматики. – М.: Колос, 1982.
4. Бородин И.Ф., Кирилин Н.И. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов. – М.: Колос, 1977.
5. Гаврилюк В.А., Гершунский В.С. Общая электротехника с основами электроники. – К.: Вища школа, 1980.
6. Гершунский В.С. Основы электроники и микроэлектроники. – К.: Вища школа, 1987.
7. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. – М.: Высшая школа, 1989.
8. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника. – М.: Высшая школа, 1990.
9. Китаев В.Е. Электротехника с основами промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1985.
10. Колесов Л.В. Основы автоматики. – М.: Колос, 1978.
11. Мартиненко І.І. Основи автоматики. – К.: Вища школа, 1980.
12. Поляков В.А. Практикум по электротехнике. – М.: Просвещение, 1977.
13. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка. Теорія і практикум: Підручник. – К.: Каравела, 2004.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Загальна електротехніка	6
1.1. Електричне поле	6
1.2. Електричні кола постійного струму	11
1.3. Електромагнетизм	40
1.4. Основні поняття про змінний струм	50
1.5. Однофазні електричні кола	57
1.6. Трифазні електричні кола	70
1.7. Електричні вимірювання	79
1.8. Трансформатори	116
1.9. Електричні машини постійного струму	125
1.10. Електричні машини змінного струму	134
2. Основи автоматики	148
2.1. Іонні прилади тліючого розряду	148
2.2. Напівпровідникові діоди	153
2.3. Транзистори	167
2.4. Тиристори	176
2.5. Фотоелектричні прилади	182
2.6. Пасивні елементи, елементи мікромініатюрного виконання	190
2.7. Електронні випрямлячі	206
2.8. Загальні відомості про системи і елементи автоматики	224
2.9. Датчики систем автоматики	239
2.10. Програмні пристрої, задавачі і елементи порівняння	264
2.11. Виконавчі елементи і реле автоматики	270
2.12. Підсилювальні елементи систем автоматики	293
2.13. Елементи теорії релейних систем автоматики. Логічні елементи.....	313
2.14. Об'єкти регулювання і регулятори	332
2.15. Запам'ятовуючі пристрої	347
Додатки	353
Література	356

Навчальне видання

**Тамара Василівна Левченко,
Вікторія Вікторівна Хоменко,
Микола Петрович Оверчук,
Михайло Васильович Стефанішен**

***Загальна електротехніка
з основами автоматики***

Навчальний посібник

Українською мовою

Відповідальний *Ю. Борхаленко*
Комп'ютерна верстка *О. Давиденко*
Дизайнер *І. Понайда*

Підписано до друку 18.12.2009 р.
Умов. друк. арк. 14,9
Наклад 1000 прим. Зам. № 365

Редакційно-видавничий відділ
Наукметодцентру
Міністерства аграрної політики України
Технікумівська, 1, смт Немішаєве
Бородянського Київської
тел. 8-04477-41-2-69

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єкта видавничої справи ДК № 2435