

**А.П. Войцицький
Г.С. Логвінов
Б.О. Антипчук**

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ Й АВТОМАТИКИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ
КОЛЕДЖ

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОНІКИ Й АВТОМАТИКИ
ПІДРУЧНИК

ЖИТОМИР
2022

УДК 621.38 (075.8)

ББК 31.2

В 51

*Затверджено до друку методичною
радою Житомирського агротехнічного
фахового коледжу
протокол № від 2022р.*

Рецензенти:

Журавльов В.П. – д.ф/м.н., професор кафедри вищої та прикладної математики Поліського національного університету;

Ципоренко В.Г. – к.т.н., доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікації Державного університету «Житомирська політехніка»;

Незведська І.В. – к.т.н., доцент Житомирського агротехнічного фахового коледжу.

В 51 Електротехніка та основи електроніки й автоматики : підручник / А. П. Войцицький, Г. С. Логвінов, Б. О. Антипчук. – Житомир : ПНУ, 2022. – 275 с.

Частина електротехніки описує основні поняття і закони електричних та магнітних кіл. Також розглянуті конструкції, принцип дії, характеристики та управління електричних машин. У частині, що стосується електроніки, подана її елементна база та електронна схемотехніка. Частина основи автоматики передбачає визначення і термінологію, класифікаційні та функціональні ознаки систем автоматики, загальні принципи побудови систем автоматичного управління. Для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» фахових коледжів.

УДК 621.38 (075.8)

© Войцицький А.П.

© Логвінов Г.С.

© Антипчук Б.О.

© ПНУ, 2022

ПЕРЕДМОВА

Безперервне розширення сфери застосування електричної енергії тягне за собою глибоке впровадження електротехніки у всі галузі промисловості, сільського господарства та побуту, а це вимагає подальшого підйому електроозброєності праці, широкої автоматизації виробничих процесів та використання автоматизованих систем управління. Ці обставини вимагають забезпечення такої професійної підготовки фахівців АПК, при якій вони будуть мати систему знань, умінь та навичок в актуальних для них областях електротехніки, електроніки й автоматики.

Основною метою вивчення дисципліни «Електротехніка та основи електроніка і автоматика» є формування у майбутніх спеціалістів аграрної інженерії системи спеціальних знань і практичних навичок в галузі розподілу електроенергії та основ електроніки і автоматики.

В деякому розумінні, завдання цих двох дисциплін перетинаються (обидві мають справу з процесами в електричних колах). Відмінність полягає в тому, що теорія електричних кіл дає методи роботи з абстрактними моделями, що ідеалізуються, а електроніка застосовує ці методи для побудови реальних пристроїв. Виходячи з наведених міркувань, підручник повинен містити загальні уявлення з електротехніки (основні закони) та необхідний матеріал для опанування електроніки і автоматики.

У посібнику викладено основний теоретичний матеріал дисципліни «Електротехніка і електроніка» – проілюстрований схемами, векторними діаграмами, графіками та прикладами розрахунку, що дає змогу студентам краще його засвоїти.

Ця дисципліна ґрунтується на таких дисциплінах, як «Теоретичні основи електротехніки», «Промислова електроніка», а також тісно пов'язана з такими, як «Електропривод», «Метрологія та електричні вимірювання» та «Основи автоматики» тощо.

Автори використали відому технічну літературу, а також власний досвід читання лекцій з курсу протягом багатьох років.

ВСТУП

Це парадоксально, але все ж це правда, коли кажуть, що чим більше ми знаємо, тим більше неосвіченим стаємо в абсолютному сенсі, бо тільки через просвітлення ми починаємо усвідомлювати свої обмеження.

Нікола Тесла

Виникненню електротехніки передував тривалий період накопичення знань про електрику і магнетизм, протягом якого були зроблені лише окремі спроби вживання електрики в медицині, а також для передачі сигналів.

У 17-18 століттях дослідженню природи електричних явищ були присвячені праці Ломоносова, Ріхмана, Кулона, Дівіша та ін. Для становлення електротехніки вирішальне значення мало появу першого джерела безперервного струму – вольтового стовпа (1800р.), а потім досконаліших гальванічних елементів, що дозволило в 1-ій третині 19 ст. провести багаточисельні дослідження хімічних, теплових світлових і магнітних явищ, що викликаються електричним струмом (праці Петрова, Ерстеда, Араго, Фарадея, Генрі, Ампера, Ома та ін.). У цей період були закладені основи електродинаміки, відкритий найважливіший закон електричного ланцюга – Ома закон.

Відкриття електромагнітної індукції (1831-32) зумовило появу електричних машин – двигунів і генераторів. Період вдосконалення конструкції електродвигуна – від лабораторних приладів, що демонстрували можливість перетворення електричної енергії в механічну (установка Фарадея 1821), до машин промислового типу – охоплює приблизно 50 років.

Починаючи з середини 30-х рр. 19 ст., стали будуватися двигуни з обертальним якорем. Таким електродвигуном, що отримав практичне застосування, був двигун, розроблений Якобі (1834-38). Поряд з електромашинними генераторами продовжували удосконалюватися хімічні джерела струму.

Значним кроком в цьому напрямі був винахід свинцевого акумулятора (французький фізик Планте, 1859). Вдосконалена

конструкція цього акумулятора до 80 рр. вже мала всі основні елементи сучасних акумуляторів.

Подальший розвиток електротехніки пов'язано зі створенням електротехнічної промисловості та масовим поширенням електричного освітлення, яке в 50-70-х рр. 19 ст. замінило газове. Першими електричними джерелами світла були всілякі дугові вугільні лампи, серед яких найбільш дешевою і простою була «свічка Яблочкова» (Яблочков, 1876).

У 1870-75 Лодигін розробив декілька типів ламп розжарювання, вдосконалених пізніше Едісоном і що набули переважного поширення до 90 рр. 19 ст.

Але розширення області практичного використання електричної енергії стало можливе лише в 70-80-і рр. 19 ст. з вирішенням проблеми передачі електроенергії на відстань. Перша лінія електропередачі на постійному струмі була побудована Дебре 1882 р. між містами Місбахом і Мюнхеном (довжина лінії 57 км., напруга в ній 1,5-2 кВ).

В 70-80-і рр. 19 ст. електроенергію почали використовувати в технологічних процесах: при здобутті алюмінію, міді, цинку, високоякісних сталей; для різання і зварювання металів; зміцнення деталей при термічній обробці тощо. Методи дугового електрозварювання були запропоновані Бенардосом (1885) і Славяновим (1891).

У 1878 Сименс створив промислову конструкцію електроплавильної печі, а у 1879 побудував дослідну електричну дорогу в Берліні.

У 80-і рр. трамвайні лінії були відкриті в багатьох містах Західної Європи, а потім в Америці (США). У Росії перший трамвай був пущений в Києві в 1892. У 90-і рр. електрична тяга була застосована і на підземних залізницях (у 1890 в Лондонському метрополітені, в 1896 – в Будапештському), а потім на магістральних залізницях.

Наприкінці 19 ст. промислове використання електроенергії перетворилося на найважливішу комплексну техніко-економічну проблему: поряд з економічною електропередачею необхідно було мати електродвигун, що відповідає вимогам електроприводу.

Розв'язання цієї проблеми стало можливим після створення багатофазних, зокрема трифазних, систем змінного струму.

Над цією проблемою працювали багато інженерів і учені (Н. Тесла, американський учений Ч. Бредлі, німецький інженер Ф. Хазельвандер і ін.), але комплексне рішення запропонував в кінці 80-х рр. М. О. Доліво-Добровольський, який розробив ряд промислових конструкцій трифазних асинхронних двигунів, трифазних трансформаторів, і в 1891 побудував трифазну лінію електропередачі Лауфен – Франкфурт (довжина лінії 170 км).

Практичне застосування трифазних систем поклав початок сучасному етапу розвитку електротехніки, який характеризується зростаючою електрифікацією промисловості, сільсько-го господарства, транспорту, сфери побуту та ін.

Будівництво потужних ЛЕП високої напруги привело до розробки всілякого високовольного устаткування, електроізоляційних матеріалів, засобів техніки електровимірювання стимулювало поліпшення конструкцій електричних машин і апаратів.

Успіхи електротехніки зробили істотний вплив на розвиток радіотехніки й електроніки, телемеханіки та автоматики, а також обчислювальної техніки і кібернетики.

Практичні завдання електроніки: розробка електронних приладів і пристроїв, що виконують різні функції в системах перетворення і передачі інформації, в системах управління, в обчислювальній техніці, а також в енергетичних пристроях; розробка наукових основ технології виробництва електронних приладів і технології, що використовує електронні й іонні процеси та прилади для різних галузей науки і техніки.

Електроніка зародилася на початку 20 ст. після створення основ електродинаміки (1856–1873), дослідження властивостей термоелектронної емісії (1882–1901), фотоелектронної емісії (1887–1905), рентгенівських променів (1895–1897), відкриття електрона (Дж. Томсон, 1897), створення електронної теорії (1892–1909).

Розвиток Електроніки почався з винаходу лампового діода (Дж. А. Флемінг, 1904), триелектродної лампи – тріод-пентода (Л. де Форест, 1906); використання тріод-пентода для генеру-

вання електричних коливань (німецький інженер А. Мейснер, 1913); розробки потужних генераторних ламп з водяним охолодженням (М. О. Бонч-Бруєвич, 1919-25) для радіопередавачів, використовуваних в системах далекого радіозв'язку і радіомовлення.

Використання кристалічних напівпровідників як детекторів для радіоприймальних пристроїв (1900-1905), створення купоросних і селенових випрямлячів струму і фотоелементів (1920–1926), винахід кристаліна (О. В. Лосєв, 1922), винахід транзистора (В. Шоклі, В. Браттейн, Дж. Бардін, 1948) визначили становлення і розвиток напівпровідникової електроніки.

Розробка планарної технології напівпровідникових структур (кінець 50 – початок 60-х рр.) і методів інтеграції багатьох елементарних приладів (транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів) на одній монокристалічній напівпровідниковій пластині привело до створення нового напрямку – мікроелектроніки (інтегральної електроніки).

Створення квантових генераторів визначило якісно нові можливості електроніки, зв'язані з використанням джерел потужного когерентного випромінювання оптичного діапазону (лазерів) і побудовою надточних квантових стандартів частоти.

В Україні вагомий внесок у розвиток автоматики також зробили: кібернетик, академік НАН України (2003) О. Івахненко, фахівець з автоматики, системотехнік, академік НАН України (1978) Б. Тимофєєв, кібернетик, академік АН УРСР (1972) О. Кухтенко та багато інших, чий винаходи посідають чільне місце в розвитку теорії та практики автоматики.

Нині автоматизація широко застосовується в різних галузях господарювання: промисловості, зв'язку, на транспорті, в комунальному господарстві, а також у військовій справі.

В ряді галузей промислового виробництва створюються повністю автоматизовані цехи та заводи.

Задачами автоматизації виробництва є: автоматичний контроль (включаючи автоматичну сигналізацію й автоматичний захист устаткування), автоматичне регулювання та автоматичне керування.

СПИСОК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСД – асинхронний двигун
АМ - амплітудна модуляція
АХ - амплітудна характеристика
АЦП - аналого-цифровий перетворювач
АЧХ - амплітудно-частотна характеристика
ВІС - велика інтегральна схема
БПД - блок живлення
ВАХ - вольт-амперна характеристика
ВЧ - висока частота
ГПС – генератор постійного струму
ДПС – двигун постійного струму
ДК - диференційний каскад
ІК - інфрачервоні промені
ІМС - інтегральна мікросхема
ДЖ - джерело живлення
КВА - контрольно-вимірювальна апаратура
КЗ – коротке замикання
ККД - коефіцієнт корисної дії
МЕК - Міжнародний електротехнічний комітет
МПС – машина постійного струму
ОП - операційний підсилювач
НЗС - негативний зворотний зв'язок
НС – намагнічувальна сила
ППЗУ - програмований постійний
запам'ятовуючий пристрій
ПП - підсилювач потужності
ППС - підсилювач постійного струму
ПР – пусковий реостат
ТКС - температурний коефіцієнт опору
ТПМ - технологія поверхневого монтажу
СГ – синхронний генератор
СД – синхронний двигун
СК – синхронний компенсатор

Частина I

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Електротехніка – галузь науки і техніки, пов’язана із застосуванням електричних і магнітних явищ для перетворення енергії, добування і зміни складу хімічних речовин, виробництва та обробки матеріалів; галузь, що охоплює питання отримання –сукупність галузей господарства, що вивчають

Електротехніка виділилася в самостійну науку з фізики в кінці XIX століття, після комерціалізації телеграфу і засобів передачі

Розділ I ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

Загальні відомості

Електричні кола та їх основні елементи

Закон Ома

Закони Кірхгофа

Закон Джоуля - Ленца

Застосування законів Ома та Кірхгофа для розрахунків струмів

1.1 Загальні відомості

У даний час основні поняття електротехніки визначаються чинними термінологічними стандартами і рекомендаціями Міжнародної Електротехнічної Комісії (МЕК) на основі Публікації 50 (група 05 – Основні визначення) Міжнародного Електротехнічного Словника (МЕМ, 2-е видання, 1954 р., франц. та англ.) і міждержавним стандартом ГОСТ 19880-74 “ЕЛЕКТРОТЕХНІКА. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ. Терміни та визначення”.

Виникненню електротехніки передував тривалий період накопичення знань про електрику і магнетизм, протягом якого

були зроблені лише окремі спроби вживання електрики в медицині а також для передачі сигналів.

У 17-18 століттях дослідженню природи електричних явищ були присвячені праці Ломоносова, Ріхмана, Кулона, Дівіша і ін.

Для становлення електротехніки вирішальне значення мало появу першого джерела безперервного струму – вольтова стовпа (1800р.), а потім досконаліших гальванічних елементів, що дозволило в 1-ій третині 19 ст. провести багато-чисельні дослідження хімічних, теплових світлових і магнітних явищ, що викликаються електричним струмом (праці Петрова, Ерстеда, Араго, Фарадея, Генрі, Ампера, Ома та ін.). У цей період були закладені основи електродинаміки, відкритий найважливіший закон електричного ланцюга – Ома закон.

Відкриття електромагнітній індукції (1831-32) зумовило появу електричних машин – двигунів і генераторів. Період вдосконалення конструкції електродвигуна – від лабораторних приладів, що демонстрували можливість перетворення електричної енергії в механічну (установка Фарадея 1821), до машин промислового типу – охоплює приблизно 50 років.

Починаючи з середини 30-х рр. 19 ст. стали будуватися двигуни з обертаючим якорем. Таким електродвигуном, що отримав практичне застосування, був двигун, розроблений Якобі (1834-38).

Подальший розвиток електротехніки пов'язано з створенням електротехнічній промисловості і масовим поширенням електричного освітлення, яке в 50-70-х рр. 19 ст. замінило газове. Першими електричними джерелами світла були всілякі дугові вугільні лампи, серед яких найбільш дешевою і простою була «свічка Яблочкова» (Яблочков, 1876).

У 1870-75 Лодигін розробив декілька типів ламп розжарювання, вдосконалених пізніше Едісоном і що набули переважного поширення до 90 рр. 19 ст. Але розширення області практичного використання електричної енергії стало можливе лише в 70-80-і рр. 19 ст. з вирішенням проблеми передачі електроенергії на відстань.

Перша лінія електропередачі на постійному струмі була побудована Дебре 1882 р. між містами Місбахом і Мюнхеном (довжина лінії 57 км., напруга в ній 1,5-2 кВ).

В 70-80-і рр. 19 ст. електроенергію почали використовувати в технологічних процесах: при здобутті алюмінію, міді, цинку, високоякісних сталей; для різання і зварки металів; зміцнення деталей при термічній обробці тощо. Методи дуговий електрозварювання були запропоновані Бенардосом (1885) і Славяновим (1891).

На прикінці 19 ст. промислове використання електроенергії перетворилося на найважливішу комплексну техніко-економічну проблему – поряд з економічною електропередачею необхідно було мати електродвигун, що задовольняє вимогам електроприводу. Вирішення цієї проблеми стало можливим після створення багатофазних, зокрема трифазних, систем змінного струму.

Над цією проблемою працювали багато інженерів і учені (Н. Тесла, американський учений Ч. Бредлі, німецький інженер Ф. Хазельвандер і ін.), але комплексне рішення запропонував в кінці 80-х рр. М. О. Доливо-Добровольський, який розробив ряд промислових конструкцій трифазних асинхронних двигунів, трифазних трансформаторів, і в 1891 побудував трифазну лінію електропередачі Лауфен - Франкфурт (довжина лінії 170 км.) .

1.2 Електричні кола на постійному струму та їх основні елементи

Електричне коло - це сукупність пристроїв, що генерують, передають, перетворюють та споживають електричну енергію.

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

Джерела живлення бувають:

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

Пристрої, що споживають електричну енергію, називаються *приймачами* електричної енергії або навантаженням. Приймачами електричної енергії можуть бути:

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

Перетворювачі електричної енергії можуть розглядатися для різних сторін електричного кола як джерела або як споживачі енергії (наприклад трансформатори). Кожний пристрій електричного кола має назву елемента електричного кола. На рис. 1.1. зображено електричну схему простого електричного кола. Таке коло зветься одноконтурним тому, що по ньому протікає один тільки струм. Таке коло не має розгалужень.

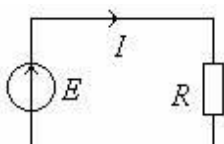


Рисунок 1.1 – Просте електричне коло

E – джерело електричної енергії, джерело напруги (електрорушійна сила EPC);

I – струм;

R – навантаження, опір (резистор).

Електричне коло, в якому протікає більше одного струму зображується складнішою розгалуженою схемою (рис. 1.2).

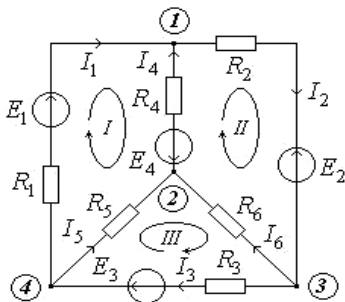


Рисунок 1.2 – Складне електричне коло

До величин електричного кола належать:

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

Електричний струм – спрямований рух носіїв електричних зарядів, величина струму - це кількість електрики (заряд), що проходить перерізом провідника в одиницю часу.

Прийняті позначення:

- I - сила постійного струму;
- i - миттєве значення змінного струму.

Напруга - це енергія, яку витрачає кожний електричний заряд у приймачі електричної енергії, напруга ділянки кола дорівнює різниці електричних потенціалів кінців ділянки.

Прийняті позначення:

- U – постійна напруга;
- u – миттєве значення змінної напруги.

Електрорушійна сила (ЕРС) – енергія, яку одержує кожний електричний заряд у джерелі електроенергії.

ЕРС позначається так:

- E — постійна ЕРС;
- e - миттєве значення змінної ЕРС.

До параметрів електричного кола належать:

- опір (провідність);
- ємність;
- індуктивність;
- взаємна індуктивність.

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

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

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

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

У загальному випадку кожний реальний елемент має R , L та C . Інколи є можливість обмежитися лише одним параметром. Такі елементи називаються *ідеальними*. Наприклад, ідеальне джерело живлення має тільки E , ідеальний опір – тільки R .

Елементи електричного кола бувають активними та пасивними. Якщо роботу елемента описують за допомогою поняття параметрів (R , L , C та M), цей елемент – *пасивний*.

Якщо для опису роботи елемента потрібно вживати поняття величини електричного кола (I , U , E), то цей елемент – *активний*. До активних елементів належать усі джерела живлення та деякі приймачі (акумулятори, двигуни та ін.).

Елементи схеми:

Вузол – точка в якій сходяться не менше трьох струмів (точка розгалуження струмів). Маємо чотири вузли: 1,2,3,4.

Вітка – частина кола між двома суміжними вузлами, по вітці протікає один струм. Маємо шість віток.

Контур – будь-який замкнений шлях, що проходить по кількох вітках. Маємо сім контурів.

Незалежний контур – відрізняється від інших (раніше обраних) хоч би однією віткою.

Джерело електричної енергії – активний елемент електричного кола, тому що примушує рухатися заряди проти Кулонових сил.

ЕРС вимірюється у *вольтах* (B), струм в *амперах* (A), опір в *омах* (Om).

Резистор – пасивний елемент електричного кола.

Елементи кола описуються вольтамперною характеристикою (BAX).

Вольт-амперна характеристика – залежність струму, що проходить через елемент від напруги на ньому.



Алессандро Вольта

1.3 Закон Ома

Закон Ома – це твердження про пропорційність сили струму в провіднику прикладеній напрузі. Закон Ома справедливий для провідників, виготовлених із матеріалів, у яких є вільні носії заряду: електрони провідності, дірки або іони. Якщо до таких провідників прикласти напругу, то в провідниках виникає електричне поле, що змушуватиме носії заряду рухатися.

Під час цього руху носії заряду прискорюються й збільшують свою кінетичну енергію. Проте зростання енергії носіїв заряду обмежене зіткненнями між собою, зі зміщеними з положень рівноваги внаслідок теплового руху атомами матеріалу, з домішками. При таких зіткненнях надлишкова кінетична енергія носіїв струму передається коливанням кристалічної ґратки, виділяючись у вигляді тепла. В середньому носії заряду мають швидкість, яка визначається частотою зіткнень.



Георг Симон Ом

Математичною характеристикою таких зіткнень є час розсіяння і зв'язана із ним довжина вільного пробігу носіїв заряду. Обчислення показують, що середня швидкість носіїв заряду пропорційна прикладеному електричному полю, а отже й напрузі. Таким чином, у матеріалах із вільними носіями заряду сила струму пропорційна напруженості електричного поля. Проходження струму через матеріал супроводжується виділеннями тепла. Детальніше про це у статті закон Джоуля-Ленца. Струм між двома точками в електричному колі може протікати тільки тоді коли вони мають різні потенціали.

Потенціал – робота по перенесенню заряду із даної точки в точку з нульовим потенціалом. Нульовий потенціал має поверхня Землі, тому й поняття «заземлити» означає прийняти потенціал даної точки за нуль. Потенціал будь-якої точки в

електричному колі можна прийняти за нульовий, потенціали всіх інших точок відповідно зміняться, але різниця потенціалів точок залишиться без зміни.

Різниця потенціалів двох точок це напруга між цими точками. На рис. 1.3, *a* зображено ідеальну *EPC* (E). Прийнемо, що потенціал точки *b* дорівнює нулю, «заземлимо», $\varphi_b = 0$, потенціал точки *a* вищий потенціалу точки *b* на величину E , $\varphi_a = E$. Напруга U_{ab} між точками *a*, *b* буде дорівнювати:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \varphi_a = E. \quad (1.1)$$

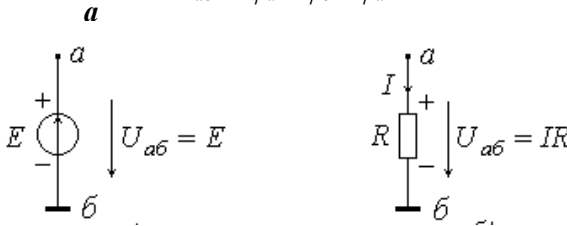


Рисунок 1.3 – Ідеальна *EPC*

Якщо проходити через *EPC* від «-» до «+» то потенціал зростає на величину *EPC*, напруга $U_{ab} = E$ буде додатна у випадку проходження через *EPC* у напрямку від «+» до «-» (проти вістря стрілки).

Очевидно, що струм тече від точки з вищим потенціалом до точки з нижчим потенціалом, аналогічно, як і вода тече від верхнього рівня до нижнього. Тому потенціал точки *a* вищий від потенціалу точки *b* на величину падіння напруги IR на опорі R .

На рис. 1.4. зображена частина електричного кола, з *EPC* (джерелами напруги) та опорами, між точками *a*, *b*, по якій протікає струм I .

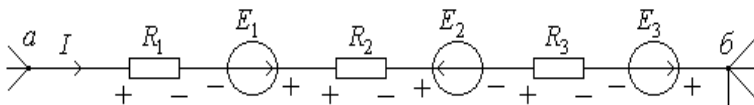


Рисунок 1.4 – Частина складного електричного кола

Потенціал точки a відносно потенціалу точки b (напрямок проти струму):

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = -E_1 + E_2 - E_3 + I(R_1 + R_2 + R_3). \quad (1.2)$$

Звідки:

$$I = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (1.3)$$

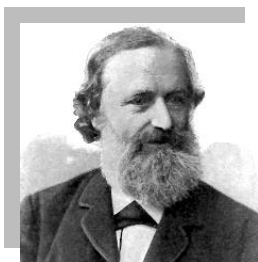
Це запис закону Ома, де струм вітки між точками a , b виражається за потенціалами точок чи за напругою між точками і параметрами вітки. Якщо електричне коло складається тільки з одного контуру (рис. 1. 1), отримаємо закон Ома для замкненого кола з одним струмом:

$$I = \frac{U_{ab}}{R}. \quad (1.4)$$

В повному колі окрім опору навантаження є ще джерело живлення, яке має свій власний внутрішній опір ($r_{вн.}$). Сила струму в колі визначається за формулою:

$$I = \frac{U_{ab}}{R + r_{вн.}}. \quad (1.5)$$

Це співвідношення отримало назву “Повного закону Ома”.



Густав Роберт Кірхгоф

1.4 Закони Кірхгофа

Закони Кірхгофа (Kirchhoffsches Gesetz) в електротехніці – встановив Густав Кірхгоф. Основними законами теорії кіл поряд із законом Ома є закон балансу струмів у розгалужених (1-й закон Кірхгофа) та балансу напруг на замкнених ділянках кола (2-й закон Кірхгофа).

Цим законам відповідають всі електричні кола (лінійні та нелінійні) при всьлякому характері зміни в часі струмів та напруг.

1-й закон Кірхгофа – алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю.

$$\sum I_k = 0.$$

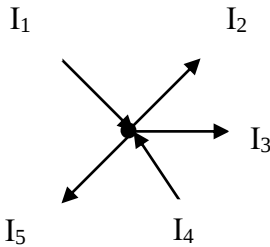


Рисунок 1.5 – Ілюстрація 1-го закону Кірхгофа

Знаки струмів обираються з врахуванням позитивних напрямків її напрямів. Всім струмам, напрямленим до вузла, надаються однакові знаки, наприклад «+», а струми які направлені від вузла отримують знак «-».

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0 \quad (1.6)$$

Перший закон Кірхгофа виражає той факт, що у вузлі електричний заряд не накопичується і не витрачається. Сума електричних зарядів (струмів), що втікають до вузла, дорівнює сумі зарядів (струмів), що витікають з вузла за один і той самий проміжок часу.

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5 \quad (1.7)$$

Другий закон Кірхгофа зв'язує спади напруг на опорах у замкненому контурі з електрорушійними силами (ЕРС) E у цьому контурі. Він формулюється так: алгебраїчна сума ЕРС у

замкненому контурі дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруг на всіх його елементах і записується у вигляді:

$$\sum_{Ki} I_K R_K . \quad (1.8)$$

При цьому спади напруг, які спрямовані по струмах записуються зі знаком “+”, якщо їх напрям збігається з обходом контура, і зі знаком “-” – коли ці напрямки протилежні.

1.5 Режими роботи електричного кола

Виділяють три основні режими роботи: навантажувальний (або узгоджений), режим короткого замикання, а також режим холостого ходу. Вони відрізняються один від одного навантаженням на електричну ланцюг. Також можна виділити номінальний режим роботи. В цьому режимі роботи всі пристрої в ланцюзі працюють за умов, зазначених для них як оптимальні.

Навантажувальний режим. Іншими словами можна сказати, що навантажувальний або узгоджений режим роботи є режим, при якому відбувається передача навантаження підвищеної потужності від джерела. В цьому режимі опір навантаження одно внутрішньому опору джерела, при цьому витрачається максимальна потужність. Однак, такий режим не рекомендується використовувати, так як при тривалому перевищенні номінальних значень пристрої можуть вийти з ладу. *При даному режимі роботи $I=E/R_i$, а $U=E-I \cdot R_i$.*

Режим роботи холостого ходу. Цей режим роботи електричного кола характеризує розімкнуте її стан - струм відсутній, і всі елементи відключені від джерела живлення. В такому стані ланцюга внутрішнє падіння напруга дорівнює нулю, а напруга на затискачах джерела живлення збігається з ЕРС джерела. Тобто при даному режимі роботи $R = \infty$; $U=E$; $I=0$.

Режим короткого замикання. Цей режим роботи вважається аварійним, електричне коло не може працювати нормально. Коротке замикання виникає при з’єднанні двох різних точок ланцюга, різниця потенціалів яких відрізняється.

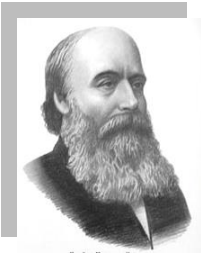
Такий стан не передбачено виробником пристрою і порушує його нормальну роботу. В цьому режимі роботи затискачі джерела енергії замкнуті провідником («закорочені»), при цьому його опір близько до нуля.

У деяких випадках це є результатом неправильних дій з боку персоналу, що працює з електротехнічним обладнанням.

Отже при даному режимі роботи:

$$R=0; U=0; I=E/R_0.$$

При проходженні електричного струму через електричне коло можуть проходити різні явища. Крім нагрівання провідників, можуть мати місце хімічні зміни в них (провідники другого роду).



Джоуль Джеймс-Прескотт



Ленц Емілій

Теплову дію струму в провіднику вперше дослідили та описали Емілій Християнович Ленс (1804-1865) (в 1842р. встановив закон теплової дії електричного струму) та незалежно від нього, англійський фізик Джоуль Джеймс-Прескотт (1818-1889) (встановив залежність кількості теплоти, що виділяється в провіднику при проходженні струму від інших фізичних величин).

Знаючи роботу, яку виконує електричний струм за деякий проміжок часу, можна розрахувати і потужність струму.

Під потужністю струму так само, як і в механіці, розуміють роботу, яка виконується за одиницю часу. З формули $A = U \cdot I \cdot t$, за якою визначають роботу електричного струму, слідує, що його потужність:

$$P = U \cdot I \cdot t / t = U \cdot I.$$

Таким чином, потужність постійного струму на будь-якій ділянці кола виражається як добуток сили струму на напругу між кінцями ділянки.

1 Ват – потужність струму, яка виділяється струмом в 1 А у провіднику, між кінцями якого підтримується напруга 1 В.

Закон Джоуля-Ленца – фізичний закон, що дає кількісну оцінку теплової дії електричного струму. Закон був експериментально встановлений у 1840 році англійським фізиком Джеймсом Прескоттом Джоулем і незалежно від нього російським вченим Емілієм Ленцом в 1842 році.

Фізичною природою виділення тепла при проходженні струму через провідник є те, що потенціальна енергія носіїв заряду, які подолали ділянку кола зменшується, а кінетична енергія залишається в середньому однаковою на початку й у кінці шляху. Втрачена носіями заряду передається коливанням атомів провідника і переходить у тепло.

Математичний запис закону:

$$Q = U \cdot I \cdot t,$$

де I – сила струму, U – падіння напруги на ділянці кола, t – час проходження струму. Застосувавши закон Ома для ділянки кола, закон Джоуля-Ленца можна записати у вигляді:

$$Q = I^2 R \cdot t, \quad (1.9)$$

де R – опір провідника.

1.6 Застосування законів Ома та Кіргофа для розрахунків струмів

1.6.1 Узагальнений метод

Для розв'язання задачі за допомогою законів Кірхгофа необхідно скласти рівняння електричного стану розрахункової схеми, кола (рис. 1.6) в такій послідовності:

- вибрати довільні позитивні напрямки струмів у всіх розгалуженнях (вітках) схеми електричного кола;
- скласти рівняння для вузлів за допомогою першого закону Кірхгофа ($\sum I = 0$);
- скласти рівняння для контурів за допомогою другого закону Кірхгофа ($\sum E = \sum RI$).

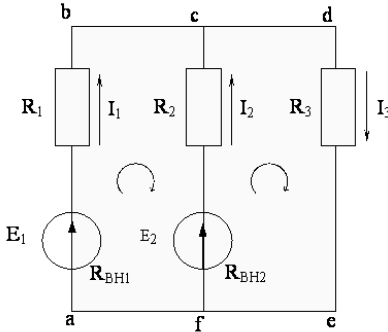


Рисунок 1.6 – Складне розгалужене коло

Складаємо вузлові рівняння. У нас два вузли, отже вузлових рівнянь буде одне.

Для вузла С:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (1.9)$$

Необхідно скласти 2 контурних рівняння.

Контур *abcfa*:

$$E_1 - E_2 = (R_1 + R_{BH1}) \cdot I_1 - (R_2 + R_{BH2}) \cdot I_2. \quad (1.10)$$

Контур *fcdef*:

$$E_2 = (R_2 + R_{BH2}) \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3. \quad (1.11)$$

Одержуємо неоднорідну систему з трьох лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0. \\ E_1 - E_2 = (R_1 + R_{BH1}) \cdot I_1 - (R_2 + R_{BH2}) \cdot I_2. \\ E_1 - E_2 = (R_1 + R_{BH1}) \cdot I_1 - (R_2 + R_{BH2}) \cdot I_2. \end{cases} \quad (1.12)$$

Як вирішувати такі системи, відомо з курсу вищої математики (через головний визначник і алгебраїчне доповнення). В даному випадку систему можна розв'язати простіше – методом виключення змінних.

1.6.2 Метод контурних струмів

Для раціональних розрахунків розгалужених електричних кіл необхідно:

- 1) вибрати незалежні контури;
- 2) для кожного контуру (рис. 1.7) складається рівняння за другим законом Кірхгофа;

3) у кожному контурі повинен проходити певний контурний струм (у лівому за годинниковою стрілкою I_{11} , а у правому – I_{22}). При цьому потрібно враховувати, що в суміжному розгалуженні (вітки) проходить струм, рівний різниці контурних струмів: $I_{11}-I_{22}$. Дана система рівнянь запишеться як:

$$\begin{aligned}(R_1 + R_2 + R_5) \cdot I_{11} + (-R_5) \cdot I_{22} &= E_1 + E_5 \\ (-R_5) \cdot I_{11} + (R_3 + R_4 + R_5) \cdot I_{22} &= E_5 - E_4.\end{aligned}$$

Перепишемо це рівняння у вигляді

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} \cdot I_{22} = E_{11} \\ R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} = E_{22} \end{cases} \quad (1.13)$$

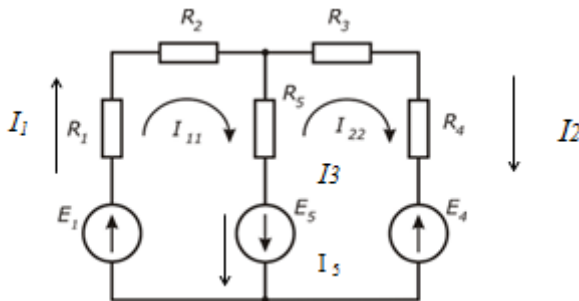


Рис. 1.7. Двоконтурне коло

де

$R_{11} = R_1 + R_2 + R_5$ – повний опір першого контуру;

$R_{22} = R_5 + R_3 + R_4$ – повний опір другого контуру;

$E_{11} = E_1 + E_5$ – ЕРС першого контуру;

$E_{22} = E_4 - E_5$ – ЕРС другого контуру.

$R_{12} = R_{21} = -R_5$ – сумісний опір.

Розв’язуючи систему рівнянь, знаходимо контурні струми:

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (1.14)$$

а потім і дійсні струми I_1 , I_2 і I_3 .

$$\left\{ \Delta = \frac{R_{11}R_{22}}{R_{21}R_{22}}; \quad \left\{ \Delta_1 = \frac{E_{11}R_{12}}{E_{22}R_{22}}; \quad \left\{ \Delta_2 = \frac{R_{11}E_{11}}{R_{21} \cdot E_{22}} \right. \right.$$

$$I_1 = I_{11}; \quad I_2 = I_{22}; \quad I_3 = I_{11} - I_{22}.$$

1.6.3 Метод двох вузлів

Найбільш раціональним методом розв’язання задачі з двома вузлами – є метод двох вузлів. Прийнемо потенціал точки “в” (рис. 1.8) рівним нулю, тоді:

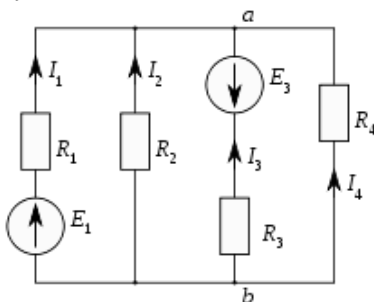


Рисунок 1.8 – Електрична схема розгалуженого кола

U_{as} визначається відповідно за формулою:

$$U_{as} = \varphi_a - \varphi_b = \varphi_a; \quad (1.15)$$

або

$$U_{ав} = \frac{\sum E \cdot q}{\sum q} = \frac{\sum \frac{E}{R}}{\sum \frac{1}{R}}. \quad (1.16)$$

Знаючи $U_{ав}$ за допомогою закону Ома знаходимо струми у розгалуженнях.



? Контрольні питання

1. Що уявляє собою електричне коло?
2. Яка природа виникнення електричного струму?
3. Які властивості постійного струму?
4. Які основні функції джерела електричної енергії?
5. В чому полягає сутність закону Ома?
6. Що враховує повний закон Ома в порівнянні з законом Ома?
7. Які існують закони Кірхгофа та умови їх застосування?
8. Які переваги методу контурних струмів перед законами Кірхгофа при розрахунках струмів у розгалуженнях електричного кола?
9. У яких випадках застосовують метод вузлових потенціалів?

Розділ 2

ОДНОФАЗНИЙ ЗМІННИЙ СТРУМ.

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Загальні уявлення

Значення синусоїдальних струмів

Векторне зображення синусоїдальних величин

Зображення синусоїдних величин комплексними числами

Розрахунок кін синусоїдного струму

Трифазні кола змінного струму. Загальні відомості

2.1 Загальні уявлення

На практиці енергію постійного струму використовують дуже обмежено, так як, наприклад, машини постійного струму за своїм виготовленням і в експлуатації значно дорожчі від машин змінного струму; електричну енергію постійного струму не можна трансформувати і передавати на великі відстані.

Ці недоліки значною мірою компенсуються при використанні змінного струму, так як генератори електричної енергії змінного струму значно дешевші, їх можна виготовляти на вищі напруги і потужності, ніж генератори постійного струму. Енергію змінного струму можна перетворювати в енергію з іншими значеннями струму і напруги (більшими або меншими, залежно від поставлених задач), що дуже важливо при передачі електроенергії на великі відстані.

Змінними називаються *EPC*, напруги і струми, які періодично змінюються в часі. В сучасному електроустаткуванні найбільше застосування отримали змінні струми, величина (і напрямки) яких змінюються за синусоїдальним законом – синусоїдальні струми. (Ще одна різновидність змінних струмів – пульсуючі, в яких періодично змінюється тільки величина).

Час T , за який струм (напруга, *EPC*) здійснює повний цикл своїх змін називають періодом змінного струму (напруги, *EPC*), а число періодів за секунду – його циклічною частотою $f = 1/T$.

Одиниця частоти – $\Gamma\text{ц}$. Частота дорівнює $1 \Gamma\text{ц}$, якщо повний цикл зміни струму здійснюється за 1 секунду.

В Європі промисловою частотою є частота $50 \Gamma\text{ц}$. В США, Канаді, Японії – $60 \Gamma\text{ц}$.

Вибір промислової частоти обумовлений техніко-економічними міркуваннями – при меншій частоті помітне мерехтіння світла в освітлювальних приладах, а при більших – виникає додатковий опір при передачі енергії на великі відстані.

Синусоїдальний характер змінного струму обумовлений характером змінної *ЕРС*, що утворюється в статорі генератора.

Від спостерігача залежить з якого моменту почати спостереження за зміною струму. Значення змінних величин – *ЕРС*, напруг, струмів, потужностей – в будь-який момент часу *t* називаються миттєвими і позначаються буквами *e*, *u*, *i*, *p*.

Графічно ординати синусоїди у визначеному масштабі представляють миттєві значення величини, а абсциси – проміжки часу від початку рахування час.

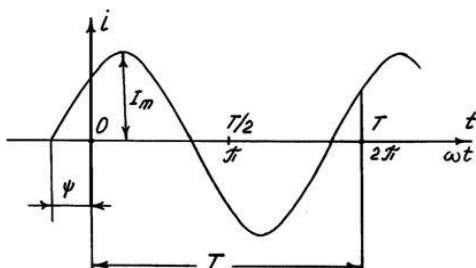


Рисунок 2.1 – Форма змінного синусоїдального струму

Таке подання дає можливість знайти амплітуду, початкову фазу і період синусоїдальної величини.

2.2 Значення синусоїдальних струмів

Для синусоїдальних струмів миттєве значення визначається виразом $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, де I_m – найбільше миттєве значення періодично змінюваних величин, яке зветься *амплітудним* значенням. Позначаються I_m , U_m , E_m .

Тому у виразі $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ присутня величина φ , яка називається початковою фазою, і яка визначає відставання моменту початку спостереження від початку поточного періоду. Якщо $\varphi = 0$, то $i = I_m \sin \omega t$.

Діюче значення змінного струму дорівнює значенню еквівалентного постійного струму, який утворює на незмінному опорі стільки ж теплоти, як і змінний струм.

$$I = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m \quad (2.1)$$

Отже діюче значення змінного синусоїдального струму менше його амплітудного значення в $\sqrt{2}$ разів.

Діючі значення U, E :

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

Діюче значення вказується на шкалах вимірювальних приладів. Тому, якщо амперметр, що вимірює силу змінного струму показує 10 A , то амплітудне значення становить – $I_m = 14,1 \text{ A}$.

Середнє значення змінного струму:

$$I_{\text{ср}} = 0,637 I_m, \\ (\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T})$$

Аналогічно визначаються $U_{\text{ср}}$ та $E_{\text{ср}}$. Отже для аналізу синусоїдального струму необхідно знати для електричних величин амплітудне (I_m, U_m, E_m) або діюче (I, U, E) значення, частоту коливань (ω, f або T ; $\omega = 2\pi f, f = 1/T$) і початкову фазу φ . Середнє значення використовується при аналізі роботи спрямовувачів, електричних машин, тощо.

2.3 Векторний метод зображення синусоїдальних величин

Векторна форма. Синусоїдальна величина може зображатися вектором, що обертається. Довжина вектора в масштабі виражає *амплітуду* синусоїди. Кут, створений вектором з позитивним напрямком осі абсцис, у початковий момент часу

дорівнює початковій фазі. Швидкість обертання вектора дорівнює кутовій частоті.

Миттєві значення синусоїдальної величини виражаються проекціями вектора на вісь ординат. За позитивний напрям обертання вибираємо обертання вектора проти годинної стрілки.

Векторною діаграмою називається сукупність векторів, що зображують декілька синусоїдальних величин однакової частоти в початковий момент часу. Складання (віднімання) двох синусоїдних величин можна проводити у векторній формі. При цьому складання (віднімання) векторів виконують за відомими геометричними правилами (правило трикутника, правило паралелограма).

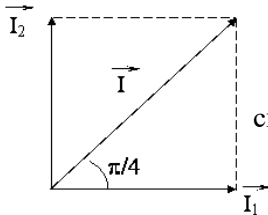


Рисунок 2.2 – Приклад складання синусоїдних величин у векторній формі.

2.4 Зображення синусоїдних величин комплексними числами

Зображення синусоїдальних величин комплексними числами дозволяє значно спростити розрахунки кіл змінного струму. Розрахунок електричних кіл суттєво полегшується, якщо зображувати синусоїдні величини векторами або комплексними числами. У цьому випадку говорять, що електричні кола розраховуються *символічним методом*.

Оскільки існує вимога, щоб у новій числовій множині рівняння $x^2 = -1$ мало розв'язок, необхідно внести деяке нове число, вважаючи його розв'язком цього рівняння.

Число, квадрат якого дорівнює -1 , позначають буквою i її називають уявною одиницею (i – перша буква латинського слова *imaginarius* – уявний).

Підкреслимо, що рівність $i^2 = -1$ приймається за означенням і не доводиться. Отже, нова множина чисел повинна містити всі числа виду $a + bi$. Числа виду $a + bi$, де a і b – довільні дійсні числа, а i – уявна одиниця називають комплекс-

сними. Слово “комплексний” означає складений. Число a називають дійсною частиною числа $a + bi$, а вираз bi – уявною.

Відповідно до вимог, що ставляться при будь-якому розширенні поняття числа, при побудові множини комплексних чисел треба ввести за означенням умову рівності цих чисел і правила виконання прямих дій – додавання і множення. Два комплексних числа $a + bi$ і $c + di$ рівні між собою тоді і тільки тоді, коли $a = c$ і $b = d$, тобто коли рівні їх дійсні частини і коефіцієнти при уявних частинах.

Вивчаючи комплексні числа, можна використовувати геометричну термінологію і геометричні міркування, якщо встановити взаємно однозначну відповідність між множиною комплексних чисел і множиною точок координатної площини. Цю відповідність можна встановити так.

Кожному комплексному числу $a + bi$ поставимо у відповідність точку $M(a; b)$ координатної площини, тобто точку, абсциса якої дорівнює дійсній частині комплексного числа, а ордината – коефіцієнту уявної частини.

Кожній точці $M(a; b)$ координатної площини поставимо у відповідність комплексне число (рис. 2.3). Вираз $r(\cos\alpha + i\sin\alpha)$ називається тригонометричною формою комплексного числа.

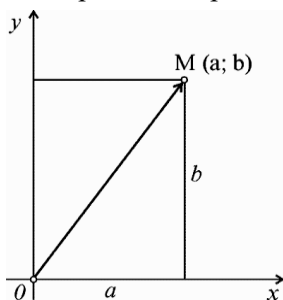


Рисунок 2.3 – Геометрична інтерпретація комплексного чисел

Довжина вектора, який зображує комплексне число, називається модулем комплексного числа. Модуль будь-якого комплексного числа, що не рівного нулю, є позитивне число:

$$r = |a + ib| = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (2.4)$$

Відповідно до формули Ейлера комплексне число e^{ia} дорівнює:

$$e^{ia} = \cos a + i \sin a, \quad (2.5)$$

на комплексній площині зображується вектором, що має одиничну довжину та складає з віссю дійсних чисел кут a .

Комплексні числа додаються, віднімаються, множаться, діляться за правилами, відомими із вищої математики.

2.5 Особливості кіл змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним опором

Елемент, в якому відбувається перетворення електромагнітної енергії в інші види енергії (теплову, променеву, механічну тощо), як необоротний процес, називають **активним резистивним опором** і позначають літерою R .

У колі з активним опором струм та напруга співпадають за фазою, а у колах з активним опором перетворення електроенергії у теплову відбувається у активному опорі, що характеризує *активна потужність* P :

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}.$$

Активна потужність P характеризує величину енергії споживану колом, яка не повертається до джерела живлення, тобто енергії, що необоротно перетворюється з електричної в інші види – наприклад, теплоту або механічну.

Вимірюється активна потужність у ватах Вт.

Індуктивності L та ємності C (котушки індуктивності та конденсатори) пропускають змінний струм.

Опір котушки індуктивності називається *індуктивним* X_L , а опір конденсатора – *ємнісним* X_C .

Кола з індуктивністю та ємністю зображені на (рис.2, а) та (рис. 3, а) відповідно.

Індуктивний та ємнісний опори можна визначити за формулами:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L ;$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C} ;$$

де f - частота струму в колі, , , ω - кутова частота.

Одиницею виміру індуктивного та ємнісного опорів є (Ом).

Оскільки в колі з конденсатором активна потужність не споживається, а відбувається обмін електричною енергією між конденсатором та джерелом і коло з індуктивністю потужності не споживає, у ній відбувається лише перекачування електричної енергії від джерела в котушку й назад, то *індуктивний та ємнісний опори є реактивними*.

У колі з індуктивністю напруга випереджає струм за фазою на $\pi/2$, що пояснюється явищем самоіндукції.

У колі з ємністю струм випереджає напругу за фазою на $\pi/2$, тому що напруга на обкладках конденсатора з'являється лише після його заряду.

У індуктивності та ємності енергія може накопичуватися у магнітному чи електричному полі, а потім віддаватися назад у коло, або зазнавати взаємних перетворень. Такі перетворення характеризуються *реактивною потужністю Q*, одиницею виміру якої є *варі (Var)*. Одиницею виміру повної потужності є *вольт-ампери (ВА)*.

2.6 Розрахунок кіл синусоїдного струму

Для нерозгалуженого електричного кола, яке складається з ідеального джерела, послідовно з'єднаних реальної котушки, ідеального конденсатора і активного резистора (рис. 2.4) відомо: *ЕРС* джерела синусоїдного струму (E), опір активного (R) та реактивних (X_L , X_C) резисторів.

Знайти:

- 1) струм у колі;
- 2) спад напруг на резисторах;
- 3) активну, реактивну та повну потужності;
- 4) коефіцієнт потужності;
- 5) миттєве значення напруг на активному і реактивних резисторах.

6. Побудувати векторну діаграму.

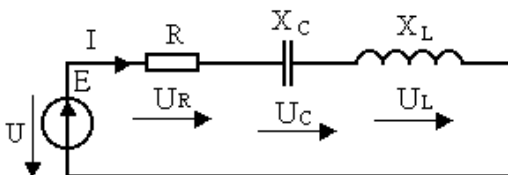


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема синусоїдального струму

За другим законом Кірхгофа значення напруги:

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt. \quad (2.5)$$

Припустимо, що струм у колі $i = I_m \cdot \sin \omega t$.

Підставимо значення струму в рівняння і отримуємо:

$$\begin{aligned} u &= RI_m \cdot \sin \omega t + \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \\ &= U_{Rm} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ), \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} U_{Rm} &= R \cdot I_m; \\ U_{Lm} &= X_L \cdot I_m; \\ U_{Cm} &= X_C \cdot I_m. \end{aligned}$$

Векторна діаграма напруг і струмів на окремих ділянках схеми відповідно до одержаного рівняння для випадку $X_L > X_C$ (рис. 2.8).

Як видно з векторної діаграми, у випадку, коли $X_L > X_C$ напруга випереджає струм на кут φ , тому миттєве значення напруги становить:

$$u = U_m \sin(\omega t + \phi).$$

Виділимо трикутник максимальних значень напруг (рис.2.2), зменшимо сторони трикутника в $\sqrt{2}$ разів і одержимо трикутник діючих значень напруг. Сторони трикутника можна знайти за формулами:

$$U_R = R \cdot I; U_L = X_L \cdot I; U_C = X_C \cdot I; U = Z \cdot I,$$

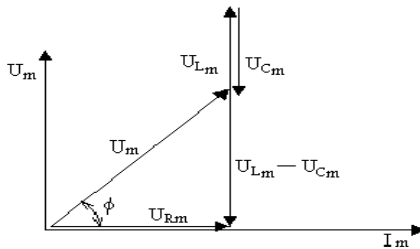


Рисунок 2.8 – Векторна діаграма напруг і струмів

де R , X_L , X_C , Z – відносно активний, індуктивний, ємкісний і повний опір кола.

Якщо сторони трикутника напруг розділити на величину струму, то одержимо трикутник опорів (рис. 2.6). Із трикутників опорів знаходимо повний опір кола синусоїдного струму та кут зсуву фаз:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}; \quad (2.6)$$

$$\varphi = \left| \arctg \frac{X_L + X_C}{R} \right|.$$

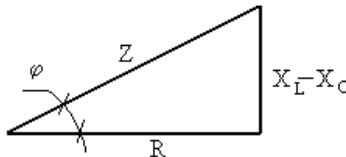


Рисунок 2.9 – Трикутник опорів

Закон Ома для діючих значень напруги і струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (2.7)$$

Помножимо сторони трикутників опорів на величину квадрату струму і одержимо трикутник потужностей (рис .2.10).

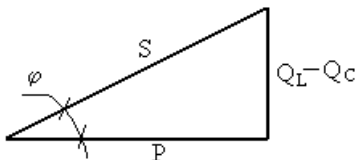


Рисунок. 2.10 – Трикутник потужностей

Сторони трикутника знаходимо за формулами:

$$\begin{aligned} P &= R \cdot I^2. \\ Q_L - Q_C &= (X_L - X_C) \cdot I^2. \\ S &= Z \cdot I^2. \end{aligned} \quad (2.8)$$

де P – активна потужність (Вт), Q_L , Q_C – реактивна потужність (Вар) і S – повна потужність кола (ВА).

Коефіцієнт потужності буде дорівнювати:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}. \quad (2.9)$$

Розрахунок нерозгалужених кіл синусоїдного струму символічним методом розглянемо для нерозгалуженого кола зображеного на рис. 2.7. За другим законом Кірхгофа:

$$U = U_R + U_L + U_C,$$

або

$$U = R \cdot i + \frac{L \cdot di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int idt.$$

Перейдемо від оригіналів до зображень:

$$\begin{aligned} i \rightarrow \dot{I}_m &= I_m \cdot e^{j\varphi_i}; & R \cdot i &\rightarrow R \dot{I}_m; \\ U \rightarrow \dot{U}_m &= U_m \cdot e^{j\varphi_u}; & L \frac{di}{dt} &\rightarrow j\omega L \dot{I}_m; \end{aligned}$$

$$\frac{1}{C} \cdot \int idt \rightarrow \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_m. \quad (2.10)$$

За другим законом Кіргофа у комплексній формі

$$\dot{U} = R \dot{I}_m + j\omega L \dot{I}_m + \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_m, \quad (2.11)$$

Звідси знайдемо зображення струму

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (2.12)$$

Множник $R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$ являє собою комплекс повного опору кола, має одиницю вимірювання (Ом) і позначається Z :

$$Z = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + jX_L - jX_C = R + jX, \quad (2.13)$$

де R – активний опір кола, $X = X_L - X_C$ – реактивний.

Запишемо закон Ома в комплексній формі для діючих значень, напруги і струму:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}. \quad (2.13)$$

З рівняння (2.13) знаходимо комплекс повного опору:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\varphi_u}}{Ie^{j\varphi_i}} = ze^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = z \cos \varphi + jz \sin \varphi = R + jX. \quad (2.14)$$

Комплекс повного опору кола та його складові зображені на комплексній площині у вигляді трикутника (рис. 2.11).

Модуль повного опору:

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

а при зсуві фаз:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} \text{ або } \varphi = \varphi_U + \varphi_I.$$

Запишемо рівняння (2.11) у комплексній формі для діючих значень:

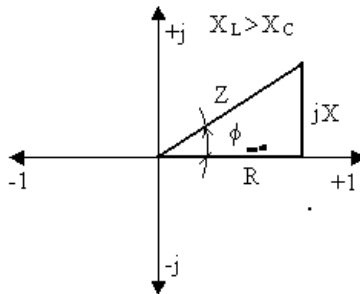


Рисунок. 2.11 – Комплексна площина повного опору кола

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (2.15)$$

Для комплексів діючих значень напруги і струму будемо вживати тільки поняття комплексна потужність. Введемо також поняття спряженого комплексу струму.

Якщо $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$, то спряжений комплекс струму буде:

$$I^* = I e^{-j\varphi_i} . \quad (2.16)$$

Добуток комплексу напруги і спряженого комплексу струму являє собою комплекс повної потужності

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{\tilde{U}} I^* = U e^{j\phi_u} \cdot I e^{-j\phi_i} = U \cdot I e^{j(\phi_u - \phi_i)} = S e^{j\phi} = \\ &= S \cos \phi + j \sin \omega \phi = P + jQ. \end{aligned} \quad (2.17)$$

де P – активна потужність, Вт, Q – реактивна потужність ВАр; S – повна потужність ВА.

2.7 Трифазні кола змінного струму. Загальні відомості

Система трьох ЕРС однакових за величиною і зміщених за фазою одне відносно одної на 120° , називається симетричною трифазною системою ЕРС. Сума миттєвих значень фазних ЕРС в кожний момент часу дорівнює нулю.

Кожну з частин багатофазної системи, що характеризується однаковим струмом, прийнято називати фазою. Ланцюги залежно від кількості фаз називають двофазними, трифазними, шестифазний і т.п.

Трифазні ланцюги – найбільш поширені в сучасній електроенергетиці. Це пояснюється рядом їх переваг порівняно як з однофазними, так і з іншими багатофазними ланцюгами:

- економічність виробництва і передачі енергії в порівнянні з однофазними ланцюгами;
- можливість отримання в одній установці двох експлуатаційних напруг – фазного та лінійного.

Трифазна ланцюг складається з трьох основних елементів: трифазного генератора, в якому механічна енергія перетворюється в електричну за трифазною системою ЕРС; лінії передачі з усім необхідним обладнанням; приймачів (споживачів), які можуть бути як трифазними (наприклад, трифазні асинхронні двигуни), так і однофазними (наприклад, лампи розжарювання).

Трифазний генератор являє собою синхронну машину двох типів: турбогенератор і гідроенератор. Модель трифазного

генератора схематично зображено на рис. 2.12. На статорі 1 генератора розміщується обмотка 2, що складається з трьох частин або, як їх прийнято називати, фаз.

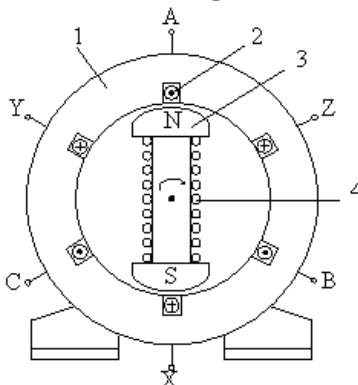


Рисунок 2.12 – Модель трифазного генератора

Обмотки фаз розташовуються на статорі таким чином, щоб їх магнітні осі були зрушені в просторі відносно один одного на кут $2\pi/3$, тобто на 120° . На рис. 2.12. кожна фаза обмотки статора умовно складається з одного витка

Початки фаз позначені буквами А, В і С, а кінці – Х, Y, Z. Ротор 3 являє собою електромагніт, порушуваний постійним струмом обмотки збудження 4, розташованої на роторі.

При обертанні ротора турбіною з рівномірною швидкістю в обмотках фаз статора індукуються та періодично змінюються синусоїдальні ЕРС однакової частоти і амплітуди, але відрізняються один від одного по фазі на 120° внаслідок їх просторового зсуву.

На схемі обмотку (або фазу) джерела живлення зображують як зображено на рис. 2.13. За умовне позитивний напрямок ЕРС в кожній фазі приймають напрям від кінця до початку.

Зазвичай ЕРС в обмотках статора мають однакові амплітуди і зрушені по фазі відносно один одного на один і той же кут 120° . Така система ЕРС називається симетричною.

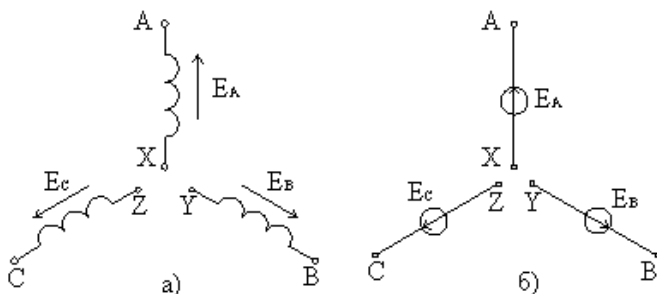


Рисунок 2.13 – Трифазна симетрична система ЕРС

Трифазна симетрична система *ЕРС* може зображуватися графіками, тригонометричними функціями, векторами і функціями комплексного змінного. Графіки миттєвих значень трифазної симетричної системи *ЕРС* зображені на рис. 2.14.

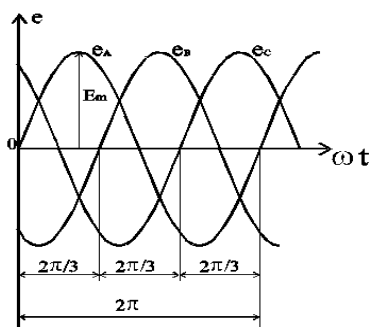


Рисунок 2.14 – Графіки миттєвих значень трифазної симетричної системи ЕРС

Якщо *ЕРС* однієї фази (наприклад, фази А) прийняти за вихідну і вважати її початкову фазу рівною нулю, то вирази миттєвих значень ЕРС можна записати у вигляді:

$$e_A = E_m \sin \omega t, e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ), e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ). \quad (2.18)$$

З графіка миттєвих значень (рис 2.14) витікає

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

Комплексні діючі ЕРС матимуть вирази:

$$E_A = E_m e^{j0^\circ} = E_m; E_B = E_m e^{-j120^\circ}; E_C = E_m e^{+j120^\circ}.$$

Векторна діаграма трифазної симетричної системи *ЕРС* зображена на рис 2.14. На діаграмі (рис. 2.14,а) вектор E_A спрямований вертикально, оскільки при розрахунку трифазних ланцюгів прийнято направляти вертикально вгору вісь дійсних величин.

З векторних діаграм рис 2.14 випливає, що для симетричної трифазної системи геометрична сума векторів *ЕРС* всіх фаз дорівнює нулю:

$$E_A + E_B + E_C = 0. \quad (2.19)$$

Систему *ЕРС*, в якій *ЕРС* фази *В* відстає по фазі від *ЕРС* фази *А*, а *ЕРС* фази *С* по фазі – від *ЕРС* фази *В*, називають системою прямої послідовності.

Якщо змінити напрямок обертання ротора генератора, то послідовність фаз зміниться (рис. 2.14,б) і називатиметься зворотною. Послідовність фаз визначає напрямок обертання трифазних двигунів.

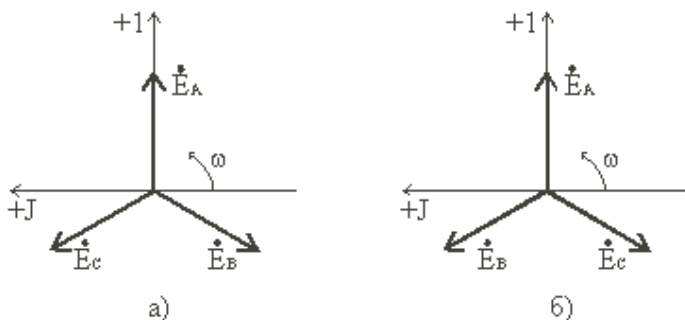


Рисунок. 2.14 –Векторні діаграми трьохфазних ЕРС

2.7.1 Симетричні режими роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка/зірка»

Три фази генератора або три фази навантаження можна з'єднати зіркою, при цьому однойменні затискачі фаз генератора або фаз навантаження об'єднуються в один вузол (рис. 2.15).

Струми та напруги позначенні у символічній формі.

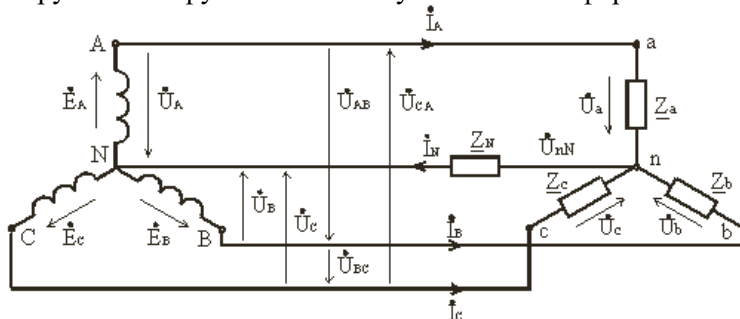


Рисунок 2.15 –Трьохфазне симетричне коло

Миттєві значення фазних і лінійних напруг трифазного генератора:

$$u_A = U_{\phi m} \sin \omega t;$$

$$u_B = U_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$u_C = U_{\phi m} \sin(\omega t - 240^\circ);$$

$$u_{AB} = U_{\Delta m} \sin(\omega t + 30^\circ);$$

$$u_{BC} = U_{\Delta m} \sin(\omega t - 90^\circ);$$

$$u_{CA} = U_{\Delta m} \sin(\omega t - 210^\circ). \quad (2.20)$$

Три провідники, що з'єднують початки фаз генератора та навантаження, називаються лінійними, а четвертий, що з'єднує вузли схеми генератора та схеми навантаження – нульовим (нейтральним). Напруга між двома лінійними проводами називається лінійною, а між лінійним і нульовим проводом - фазною.

Відповідно струм, що проходить по лінійному провіднику, називається лінійним, а по нульовому (нейтральному) – нульовим.

Якщо система симетрична зсув фазних струмів відносно один одного 120^0 . Зсув фазних струмів відносно фазних напруг залежить від характеру навантаження споживача. При активному навантаженні струми співпадають з напругами, при індуктивній – відстають на 90^0 , при ємкісній – опередають на 90^0 .

Введемо поняття фазного струму, під яким будемо розуміти струм, що проходить по фазі генератора. У трифазних колах при з'єднанні обмоток генератора зіркою і навантаження зіркою

$$I_{\phi} = I_{\text{л}}. \quad (2.21)$$

лінійна напруга дорівнює:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}. \quad (2.22)$$

ця залежність витікає з трикутника напруг (рис. 2.17)

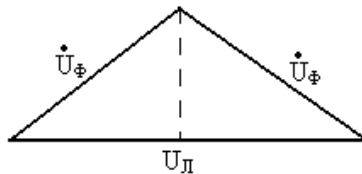


Рисунок. 2.17 – Трикутник напруг

Струми в фазах розраховуються згідно до закону Ома

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{\phi}}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{\phi}}{\underline{Z}_C}.$$

Струм, що протікає в нейтральному проводі, позначають I_N . За першим законом Кірхгофа для нейтральної точки N маємо у векторній формі:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \quad (2.23)$$

Відповідно до обраних умовними позитивними напрямками фазних і лінійних напруг можна записати рівняння за другим законом Кірхгофа.

$$(\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (2.24)$$

Згідно з цими виразами на (рис. 2.18,а) побудована векторна діаграма, з якої видно, що при симетричній системі фазних напруг система лінійних напруг теж симетрична: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} рівні за величиною і зрушені по фазі відносно один одного на 120° (загальне позначення U_l), і випереджають, відповідно, вектори фазних напруг U_A , U_B , U_C , (U_ϕ) на кут 30° .

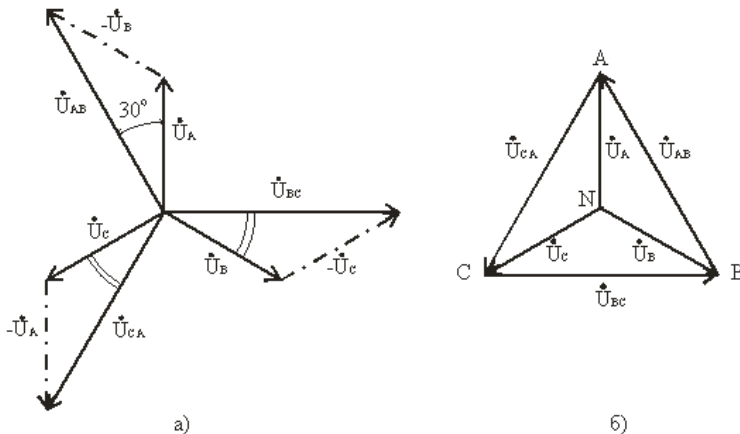


Рисунок 2.18 – Векторна діаграма симетричній системі фазних напруг при з'єднанні зірка/зірка

Діючі значення лінійних напруг можна визначити графічно по векторній діаграмі або за формулою (2.16), яка впливає з трикутника, утвореного векторами двох фазних і одного лінійного напруг:

$$U_l = 2U_\phi \cos 30^\circ \text{ або } U_l = \sqrt{3} U_\phi.$$

Передбачені ДСТУ лінійні і фазні напруги для ланцюгів низької напруги пов'язані між собою співвідношеннями:

$$U_{\text{л}} = 660\text{В} - U_{\text{ф}} = 380\text{В};$$

$$U_{\text{л}} = 380\text{В} - U_{\text{ф}} = 220\text{В};$$

$$U_{\text{л}} = 220\text{В} - U_{\text{ф}} = 127\text{В}.$$

2.7.2 Визначення потужності при симетричному та несиметричному режимах роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка/зірка»

Активна, реактивна та повні потужності, які споживають навантаження фаз, становлять

$$P = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi; \quad Q = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin \varphi; \quad S = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}}. \quad (2.23)$$

Якщо трифазна система симетрична ($Z_A = Z_B = Z_C$), то P, Q, S становлять:

$$P = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi; \quad (2.24)$$

$$Q = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi;$$

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

При несиметричному навантаженні фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C;$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C; \quad (2.25)$$

$$S = S_A + S_B + S_C.$$

2.7.3 Симетричні режими роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка-трикутник»

За позитивний напрямок лінійних струмів (I_A, I_B, I_C) приймається напрямок від джерела до навантаження (рис.2.19). Позитивний напрямок фазних струмів вибирають від точки “а” до “в” (струм I_{AB}), від точки “в” до “с” (струм I_{BC}), від точки “с” до “а” (струм I_{CA}).

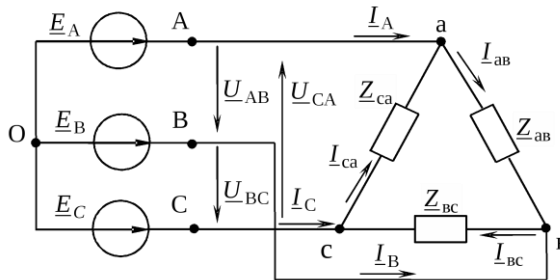


Рисунок 2.19 – Схема з'єднань трифазного кола зірка/трикутник

Миттєві значення фазних і лінійних напруг трифазного генератора:

$$u_{AB} = U_{\phi m} \sin \omega t; u_{BC} = U_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ); u_{CA} = U_{\phi m} \sin(\omega t - 240^\circ).$$

Фазні та лінійні напруги однакові.

За першим законом Кірхгофа знайдемо лінійні струми через фазні:

$$i_A = i_{ab} - i_{ca}; i_B = i_{bc} - i_{ab}; i_C = i_{ca} - i_{bc}. \quad (2.26)$$

Встановимо зв'язок між діючими значеннями фазних (I_ϕ) і лінійних (I_L) струмів навантаження при з'єднанні його фаз трикутником:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi \quad (2.27)$$

Діюче значення фазних (I_ϕ) і лінійних (I_L) струмів менше за їх миттєві в $\sqrt{2}$. Струми в фазах розраховуються згідно до закону Ома:

$$\dot{I}_{\phi A} = \frac{\dot{U}_{\phi B}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \dot{I}_{\phi B} = \frac{\dot{U}_{\phi C}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \dot{I}_{\phi C} = \frac{\dot{U}_{\phi A}}{\underline{Z}_{CA}}. \quad (2.28)$$

Активна, реактивна та повні потужності, які споживають навантаження фаз, становлять

$$P = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi; \quad Q = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi; \quad S = U_{\phi} I_{\phi}. \quad (2.29)$$

Якщо трифазна система симетрична ($Z_A = Z_B = Z_C$), то P, Q, S становлять

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi; \quad (2.30)$$

$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi;$$

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

При несиметричному навантаженні фаз

$$P = P_A + P_B + P_C;$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C; \quad (2.31)$$

$$S = S_A + S_B + S_C.$$

2.8 Резонансні явища в електричних колах

Явище резонансу можна спостерігати в будь-яких коливальних системах, у тому числі механічних і електричних.

Електричний резонанс – це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань сили струму в колі при наближенні циклічної частоти зовнішньої змінної ЕРС до частоти власних коливань ω_0 кола. Під резонансним режимом роботи кола розуміють режим при якому, не дивлячись на наявність індуктивностей і ємностей, вхідний опір і вхідна провідність кола є чисто активними. В електроенергетиці виникнення резонансу напруг внаслідок супутніх йому перенапруг загрожує небажаними наслідками.

Резонанс напруг. Умова резонансу напруг:

- 1) реактивна складова вхідного опору кола дорівнює нулю;
- 2) вхідний опір кола $Z_{\text{вх}} = R$;

3) реактивні спади напруг на котушці індуктивності та конденсаторі однакові за величиною і взаємно компенсують один одного:

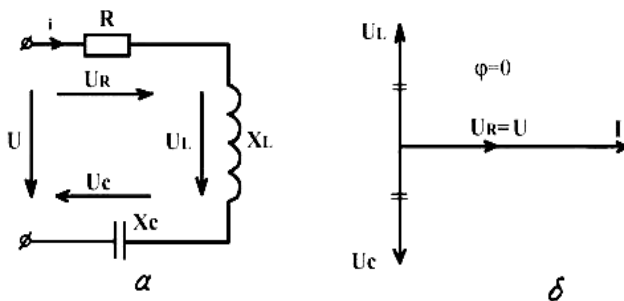


Рисунок 2.20 – Електричне коло для вивчення резонансу напруг

$$U_L = U_C; U_L = IX_L; IX_L = IX_C. \quad (2.32)$$

$$X_L = 2\pi fL; X_C = 1/2\pi fC.$$

Прикладена напруга врівноважується тільки активним спадом напруги:

$$U_R = IR. \quad (2.33)$$

Основна величини, що характеризують коло у стані резонансу напруг – резонансна частота, яка визначається за формулою:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (2.34)$$

де $\omega_o = 2\pi f$.

Резонанс струмів. При розгляді паралельного з'єднання котушки і конденсатора (рис. 2.21) було зазначено випадок рівності активної і реактивної провідності ($b_L = b_C$) елементів, які мають індуктивність та ємність. В цьому випадку електричне коло перебуває в режимі резонансу струмів, який характеризується тим, що реактивна потужність кола дорівнює нулю, струм і напруга збігаються за фазою. Вивчення цього

питання доцільно почати з векторної діаграми (рис. 2.22) електричного кола (рис. 2.21).

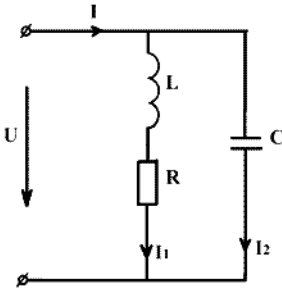


Рисунок 2.21– Електричне коло для вивчення резонансу струмів

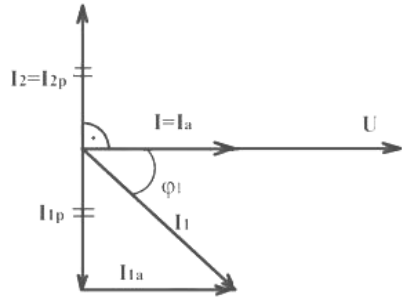


Рисунок 2.22–Векторна діаграма резонансів струмів

Перша вітка має активно- індуктивний опір, тому струм I_1 відстає від напруги на кут φ_i і має обидві складові: активну I_{1a} та реактивну I_{1p} . Друга вітка має ємнісний опір, тому струм випереджає напругу за фазою на кут 90° і має лише одну реактивну складову $-I_{2p}$.

Згідно з умовою резонансу струмів:

$$I_{1p} = I_{2p}, \quad I_{1p} + I_2 = 0, \quad I_{1a} = I. \quad (2.35)$$

Струм I_2 , користуючись векторною діаграмою, буде дорівнювати:

$$I_2 = I_{1p} = \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2} = \sqrt{I_1^2 - I^2}. \quad (2.36)$$

Напруга U враховуючи, що в стані резонансу опір кола має активний характер і кут зсуву фаз між напругою і струмом на вході кола $\varphi = 0$. В цьому разі в колі розсіюється тільки активна потужність:

$$P = UI \cos \varphi = UI. \quad (2.37)$$

$$\text{Звідси } U = P/I. \quad (2.38)$$

За законом Ома повний опір першого розгалуження:

$$Z_1 = U/I_1. \quad (2.39)$$

За формулою $P = RI_1^2$ знаходять активний опір R . Користуючись трикутником опорів для першого розгалуження, індуктивний опір X_L буде дорівнювати:

$$X_L = \sqrt{Z_1^2 - R^2}. \quad (2.40)$$

За законом Ома ємнісний опір конденсатора:

$$X_c = U/I_2.$$

2.9. Кола періодичного несинусоїдного струму

2.9.1 Загальні відомості

Для багатьох електротехнічних пристроїв робочим режимом роботи є такий режим, при якому форми кривих струмів та напруг суттєво відрізняються від синусоїдних.

Періодичні сигнали у вигляді імпульсів різної форми знаходять широке застосування у різноманітних пристроях автоматики та управління. Нарешті, у нелінійних колах навіть при синусоїдній формі вхідних сигналів виникають сигнали – відгуки несинусоїдної форми.

2.9.2 Розкладання періодичних несинусоїдних функцій у тригонометричний ряд Фур'є

Нехай періодична функція $f(t)$ (рис. 4.1) має період T , тобто:

$$f(t) = f(t + T)$$

Позначимо $\omega = 2\pi/T$ і будемо називати ω основною кутовою частотою. Гармонічні складові ряду з такою частотою створюють *основну гармоніку*. Складові з більш високими кутовими частотами називаються *вищими гармоніками*.

Згідно з умовами Дирихле, така функція має кінцеве число відносних максимумів та мінімумів, а також точок розриву першого роду на деякому кінцевому інтервалі.

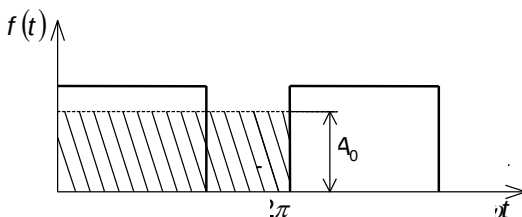


Рисунок 2.23—Періодична функція $f(t)$

Гармонічний ряд Фур'є у тригонометричній формі записується у вигляді:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{km} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_{km} \cos k\omega t$$

де A_0 – постійна складова або *нульова гармоніка*. Вона дорівнює середньому значенню функції $f(t)$ за її період.

Геометрично середнє значення функції за період визначається висотою прямокутника з основою T , площа якого обмежена віссю абсцис та графіком функції $f(t)$ за період (рис. 7.1).

Постійну складову напруги чи струму вимірюють приладами магнітоелектричної системи. Якщо площі додатних та від'ємних значень функції $f(t)$ за період однакові (як, наприклад, для гармонічних сигналів), то середнє значення за період такої функції дорівнює нулю.

Інші складові ряду визначають набір гармонічних складових, частоти яких кратні основній частоті ω :

B_{km} – амплітуда синусної складової k -ї гармоніки;

C_{km} – амплітуда косинусної складової k -ї гармоніки.

2.2.10 Діючі та середні значення несинусоїдних ЕРС, напруг та струмів

Діюче значення періодичної функції (або середньоквадратичне значення за період) визначається за формулою:

$$F = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} A_k^2} = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + \dots}$$

Для кіл періодичного несинусоїдного струму діюче значення ЕРС, напруг чи струмів є однією з найважливіших кількісних характеристик. Вимірюються діючі значення приладами електромагнітної, електродинамічної, електростатичної та теплової систем, а також сучасними цифровими осцилографами.

Середнє значення функції по модулю визначається за формулою:

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt$$
$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$$

Вимірюється середнє значення періодичної несинусоїдної величини приладами магнітоелектричної системи з випрямлячем.



? Контрольні питання

1. Що уявляє собою змінний струм
1. Які *ЕРС*, напруги і струми – звуться змінними?
2. За якою формулою визначають середнє значення змінного струму?
3. За якою формулою визначають діюче значення змінного струму?
4. Яким чином здійснюється складання синусоїдних величин?
5. Яким чином здійснюється зображення синусоїдних величин комплексними числами?
6. За яким алгоритмом здійснюється розрахунок нерозгалужених кіл синусоїдного струму символічним методом?
7. За яким алгоритмом здійснюється розрахунок розгалужених кіл синусоїдного струму символічним методом?
8. Які кола змінного струму називають трифазні?
9. Яким чином визначають струми у симетричних трифазних колах у разі їх сполучення «зірка/зірка»?
10. Як визначають потужність при симетричному та несиметричному режимах роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка/зірка»?
12. Як визначають потужність при симетричному та несиметричному режимах роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка/трикутник»?
13. Що уявляє собою резонанс напруг?
14. При яких умовах виникає резонанс струмів?
15. Які несинусоїдні функції можна розкласти у тригонометричний ряд Фур'є ?
16. Як звуться складові з більш високими кутовими частотами?

Розділ 3

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ. ТРАНСФОРМАТОРИ

Однофазний трансформатор. Загальні уявлення

Трифазні трансформатори

Автотрансформатори

Вимірювальні трансформатори

3.1. Однофазний трансформатор. Загальні уявлення

Трансформатор – пристрій для зміни величини сили струму і напруги змінного струму при незмінній частоті. Винайшов трансформатор російський вчений П.М. Яблочков.

У найпростішому випадку трансформатор складається з двох котушок (обмоток), надітих на замкнуте осердя. Одна з обмоток – первинна – з'єднана з джерелом змінної напруги.

Друга обмотка – вторинна – до якої приєднують навантаження, тобто прилади й пристрої, які споживають електроенергію (рис. 3.1).

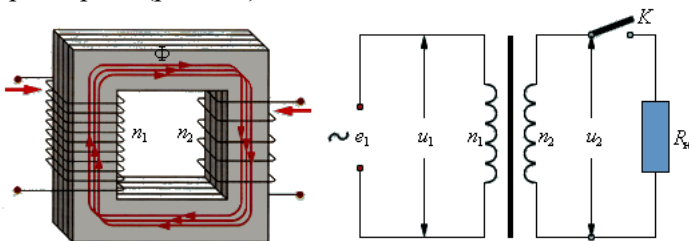


Рис. 3.1. Однофазний трансформатор

Основними характеристиками, що визначають технічний рівень трансформаторів, є:

- втрати електроенергії (холостого ходу та короткого замикання);
- матеріалоемність (витрата електротехнічної сталі, проводу, електроізоляційних матеріалів, трансформаторної оливи та ін.);
- якість виготовлення; надійність та зручність обслуговування в експлуатації.

3.1.1 Конструкція однофазних трансформаторів

Магнітна система трансформатора являє собою комплект пластин або інших елементів, виготовлених з електротехнічної сталі або іншого феромагнітного матеріалу. Існує три основних типи конструкції трансформаторів: броньовий, стрижневий і тороїдальний трансформатори (рис. 3.2). Кожен з них може мати сердечник або пластинчастий, або стрічковий роз'ємний, або стрічковий нероз'ємний.

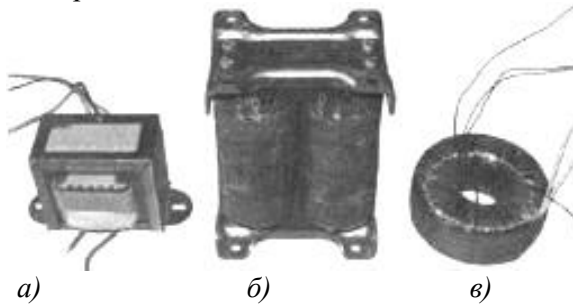


Рис. 3.2. Загальний вигляд однофазних трансформаторів:
а – броньовий; б – стрижневий; в – тороїдальний

Геометричний вигляд сердечників трансформаторів зображений на рис. 3.3. та рис. 3.4.

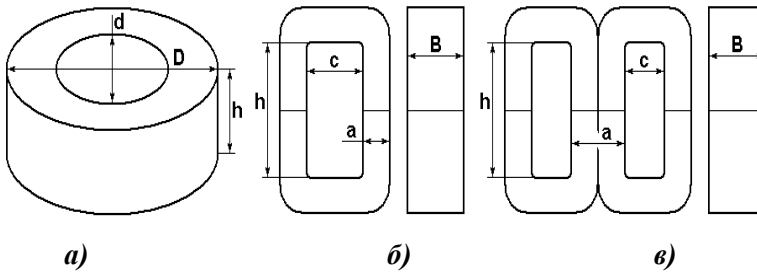


Рис. 3.3. Геометрія сердечників трансформаторів:
а – кільцевий стрічковий сердечник (ОЛ); б – П-подібний стрічковий сердечник ПЛ; Ш- подібний стрічковий сердечник (ШЛ)

На рис 3.4. зображений звичайний Ш – подібний сердечник, який у далекому минулому був основним для намотки трансформаторів.

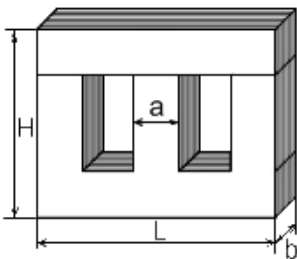


Рисунок 3.4 – Ш- подібний сердечник

При виготовленні малогабаритної радіоелектронної апаратури краще всього використовувати трансформатори з тороїдальним магнітопроводом. У порівнянні з броньовими сердечниками з Ш- подібних пластин вони мають меншу вагу і габарити, володіють підвищеним ККД, а їх обмотка краще охолоджується. Крім того, при рівномірному розподілі обмоток по периметру осердя практично відсутній поле розсіювання і в більшості випадків відпадає необхідність у екрануванні трансформаторів.

Для сердечників трансформаторів використовують холоднокатану сталі E310, E320, E330 з товщиною стрічки 0,35-0,5 мм і сталі E340, E350, E360 з товщиною стрічки 0,05-0,1 мм при частоті живильної мережі 50 Гц.

3.1.2 Принцип роботи трансформатора

Принцип роботи трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Під час проходження змінного струму по первинній обмотці в осерді виникає змінний магнітний потік. Магнітний потік, пронизуючи витки вторинної обмотки трансформатора, індукуює в ній ЕРС.

Під дією ЕРС по вторинній обмотці і через приймач енергії протікатиме струм. Отже, електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне, але з

іншою напругою, на яку розрахований приймач енергії, ввімкнений у вторинне коло.

Осердя з трансформаторної сталі концентрує магнітне поле, і магнітний потік існує практично тільки в самому осерді; він однаковий в усіх його перерізах.

При живленні первинної обмотки змінним струмом частотою f буде створюватися змінний магнітний потік Φ :

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t, \text{ Вб.} \quad (3.1)$$

Якщо в первинній обмотці трансформатора ω_1 витків, то ЕРС первинної обмотки визначається за формулою:

$$E_1 = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m \cdot B. \quad (3.2)$$

Якщо у вторинній обмотці трансформатора ω_2 витків, то ЕРС вторинної обмотки визначається за формулою:

$$E_2 = 4,44 \cdot \omega_2 \cdot \Phi_m \cdot B. \quad (3.3)$$

Відношення ЕРС первинної і вторинної обмоток, а також відношення їх витків називають коефіцієнтом трансформації і визначають за формулою:

$$K_{mp} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (3.4)$$

В процесі роботи трансформатора під навантаженням частина активної потужності P_1 , що надходить в первинну обмотку з мережі, розсіюється в трансформаторі на покриття втрат. В результаті активна потужність P_2 , що надходить в навантаження, виявляється меншою потужності P_1 на величину сумарних втрат в трансформаторі ΣP :

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (3.5)$$

В трансформаторі існує два види втрат: магнітні і електричні. Магнітні втрати P_m в сталюму магнітопроводі, по якому

замикається магнітний потік Φ_{max} , складаються з витрат на гістерезис P_z , і вихрові струми P_{ex} :

$$P_M = P_z + P_{ex}.$$

Магнітні втрати прямо пропорційні масі магнітопроводу і квадрату магнітної індукції в ньому. Вони також залежать від властивостей сталі, з якої виготовлений магнітопровід.

Зменшенню втрат на гістерезис сприяє виготовлення магнітопроводу з феромагнітних матеріалів (електротехнічної сталі), що володіють невеликою коерцитивною силою (вузькою петлею гістерезису). Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід виготовляють шихтованим (з тонких сталених пластин, ізолюваних одна від одної тонким шаром лаку або оксидної плівки) або витим з сталеної стрічки.

Магнітні втрати залежать також і від частоти змінного струму: з підвищенням частоти f магнітні втрати підвищуються за рахунок втрат на гістерезис P_z та вихрові струми P_{ex} .

Головний магнітний потік в магнітопроводі не залежить від навантаження трансформатора, тому при змінах навантаження магнітні втрати залишаються практично незмінними.

Коефіцієнт трансформації – величина, що дорівнює відношенню напруг у первинній і вторинній обмотках трансформатора під час холостого ходу (без навантаження):

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \quad (3.6)$$

Якщо $k < 1$, трансформатор називається підвищувальним. Підвищувальний трансформатор збільшує напругу. У ньому кількість витків у вторинній обмотці має бути більшою за кількість витків у первинній обмотці. Якщо $k > 0$, трансформатор називається понижувальним. Понижувальний трансформатор зменшує напругу. У ньому кількість витків у вторинній обмотці має бути меншою за кількість витків у первинній обмотці.

3.1.3 Спрощений розрахунок силових трансформаторів

У зв'язку з тим, що повний розрахунок трансформаторів занадто громіздкий і складний, використаємо більш спрощений.

Точність розрахунку цілком достатня для практичного застосування трансформаторів в електронній апаратурі. Розрахунок параметрів тороїдального трансформатора аналогічний розрахунку трансформаторів на ПЛ і ШЛ - подібному сердечнику.

1. Вибираємо конфігурацію і марку сталі трансформатора.
2. Визначаємо сумарну потужність вторинної обмотки трансформатора (S_{mp}) за формулою:

$$S_{mp} = S_2 + S_3 + \dots + S_n,$$

де S_2, S_3, S_n – повна потужність вторинних обмоток.

3. Знаходимо струми у відповідних обмотках трансформатора за формулою:

$$I_i = S_i / U_i, \quad (3.7)$$

де i – номер обмотки трансформатора; S_i – потужність відповідної обмотки трансформатора.

4. Відповідно до струмів і густини знаходимо діаметри проводів обмоток трансформатора ($S_{np. i}$):

$$S_{np. i} = I_i / j_i, \quad (3.8)$$

де j_i – густина струмів, яка залежить від потужності трансформатора.

1. Діаметр (d) проводів визначаємо за формулою:

$$d_i = 1,13 \sqrt{S_{np. i}} \quad (3.9)$$

2. Визначаємо кількість витків (ω) обмоток трансформатора на один вольт за формулою:

$$\omega_i = \frac{E_i \cdot 10^4}{4.44 \cdot f \cdot B \cdot S_{n.c.} \cdot k_{3.c}}, \quad (3.10)$$

де E_i – е.р.с. i - обмотки; f – частота мережі, гц; B – магнітна індукція, Тл; $S_{n.c.}$ – переріз сердечника, см²; $k_{3.c}$ – коефіцієнт заповнення сердечника сталю; 4,44 – коефіцієнт форми кривої напруги.

Значення коефіцієнта заповнення сердечника сталю $k_{\Sigma,c}$ залежить від товщини пластинок трансформатора і визначається за табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти заповнення сердечника сталю

Товщина пластин, мм	0,5	0,35	0,2	0,1
$k_{\Sigma,c}$	0,95	0,86	0,75	0,65

При роботі трансформатора під навантаженням на опорах його обмоток відбувається падіння напруги. Тому для знаходження е.р.с. обмоток (E_i) необхідно зробити відповідні обчислення за формулою:

$$E_i = U_i \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_i}{100}\right),$$

де E_i – е.р.с. i - обмотки; U_i – напруга на відповідних обмотках; ΔU_i – відсоткове падіння напруги на обмотках.

Відсоткове падіння напруги на обмотках та $k_{\Sigma,c}$ – див. [5] .

Тип сердечника та його розміри вибирають залежно від типу трансформатора та його необхідної потужності за таблицями технічної літератури [5] або іншої.

3.1.4 Робота трансформатора під навантаженням. ККД трансформатора

Якщо до вторинної обмотки трансформатора приєднати споживач електроенергії, то сила струму у вторинній обмотці вже не буде дорівнювати нулю. Струм, що з'явився, створює в осерді свій змінний магнітний потік, який за правилом Ленца має зменшити зміни магнітного потоку в осерді.

Це приводить до автоматичного збільшення сили струму у вторинній обмотці. Збільшення сили струму в колі первинної обмотки відбувається згідно із законом збереження енергії.

В процесі роботи трансформатора під навантаженням частина активної потужності P_1 , що надходить в первинну обмотку з мережі, розсіюється в трансформаторі на покриття втрат.

В результаті активна потужність P_2 , що надходить в навантаження, виявляється меншою потужності P_1 на величину сумарних втрат в трансформаторі ΔP :

$$P_1 = P_2 + \Delta P. \quad (3.11)$$

В трансформаторі існує два види втрат – магнітні і електричні.

Магнітні втрати (P_m) в сталюму магнітопроводі, по якому замикається магнітний потік $\Phi_{\max}$, складаються з витрат на гістерезис P_σ , вихрові струми P_{ex} :

$$P_m = P_\sigma + P_{ex}. \quad (3.12)$$

Магнітні втрати прямо пропорційні масі магнітопроводу і квадрату магнітної індукції в ньому. Вони також залежать від властивостей сталі, з якої виготовлений магнітопровід.

Зменшенню втрат на гістерезис сприяє виготовлення магнітопроводу з феромагнітних матеріалів (електротехнічної сталі), що володіють невеликою коерцетивною силою (вузькою петлею гістерезису).

Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід виготовляють шихтованим (з тонких сталюх пластин, ізолюваних одна від одної тонким шаром лаку або оксидної плівки) або витим з сталюї стрічки. Магнітні втрати залежать також і від частоти змінного струму: з підвищенням частоти f магнітні втрати підвищуються за рахунок втрат на гістерезис P_σ та вихрові струми P_{ex} .

Головний магнітний потік в магнітопроводі не залежить від навантаження трансформатора, тому при змінах навантаження магнітні втрати залишаються практично незмінними.

Електричні втрати (P_e) – це втрати в обмотках трансформатора, що обумовленні нагрівом обмоток струмами, що проходять по ним. Які дорівнюють:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = I_{12} r_1 + I_{22} r_2. \quad (3.13)$$

Електричні втрати є змінними, так як їх величина пропорційна квадрату струмів в обмотках. Електричні втрати при будь-якому струмі навантаження I_2 трансформатора(Вт) будуть дорівнювати:

$$P_e = P_{e.ном} b_2 , \quad (3.14)$$

де $P_{e.ном}$ — електричні втрати при номінальному струмі навантаження; $b = I_2/I_{2ном}$ — коефіцієнт навантаження, характеризує ступінь навантаження трансформатора.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора являє собою відношення активних потужностей на його виході P_2 і вході P_1 :

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2+P_M+P_e). \quad (3.15)$$

Активна потужність на виході трансформатора, Вт,

$$P_2 = S_{ном} \cdot b \cos \varphi_2, \quad (3.16)$$

де $S_{ном}$ — номінальна потужність трансформатора, В·А;
 $\cos \varphi_2$ — коефіцієнт потужності навантаження.

3.1.5 Дослідження холостого ходу та короткого замикання

Дослідження холостого ходу проводять в наступній послідовності:

- первинну обмотку вмикають в джерело на номінальну напругу;
- вторинну обмотку залишають розімкненою.

При цьому струм в первинній обмотці I_0 , а у вторинній обмотці $I_2 = 0$ (рис.3.5,а). Амперметр А в первинному колі дає можливість визначити струм холостого ходу I_0 , який прийнято вимірювати в процентах від номінального струму $I_{Iном}$ в первинній обмотці:

$$i_0 = (I_0/I_{Iном}) \cdot 100\%. \quad (3.17)$$

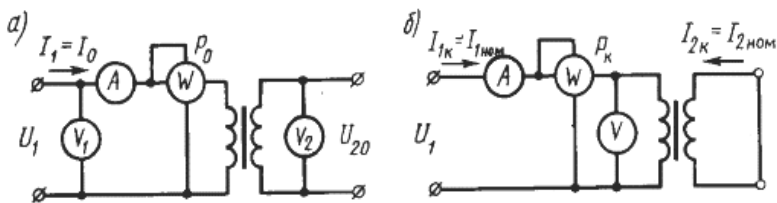


Рисунок 3.5 – Схеми ввімкнення однофазних трансформаторів при досліджах: холостого ходу (а) і короткого замикання (б)

В трансформаторах великої і середньої потужності $i_0 = (2, 10) \%$, а в трансформаторах малої потужності (менше $200 \text{ В} \cdot \text{А}$) може досягати до 40% і більше.

Струм холостого ходу I_0 разом з реактивною складовою I_{0p} , яка наводить в магнітопроводі головний магнітний потік, має активну складову I_{0a} , яка обумовлена магнітними втратами в магнітопроводі трансформатора.

Використання якісних електротехнічних сталей з невеликими питомими втратами сприяє зменшенню активної складової струму холостого ходу до значення, що не перевищує 10% . Результуючий струм холостого ходу, A ,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (3.18)$$

Якщо струм холостого ходу I_0 , отриманий дослідним шляхом, набагато перевищує значення, вказане в каталозі на досліджуваний тип трансформатора, то це свідчить про несправність трансформатора: наявність короткозамкнених витків в обмотках; порушення електричної ізоляції між деякими пластинами (полосами) магнітопроводу.

При дослідженні холостого ходу $U_{20} = E_2$ та $U_1 \gg E_1$, тому, використовуючи показники вольтметрів $V1$ і $V2$, можна з необхідною точністю визначити коефіцієнт трансформації :

$$k = U_1/U_{20}. \quad (3.19)$$

Ватметром W в первинному колі трансформатора вимірюють потужність P_0 , що використовується трансформатором в режимі холостого ходу. В трансформаторах потужністю 200-300 В·А електричні втрати в первинній обмотці внаслідок невеликої величини струму I_0 невеликі, тому вважаємо потужність холостого ходу рівною магнітним втратам, тобто $P_0 = P_m$.

Дослідження короткого замикання виконують наступним чином. Вторинну обмотку трансформатора замикають накоротко (3.5,б), а до первинної обмотки підводять понижену напругу короткого замикання $U_1 = U_k$, при якій струм короткого замикання в первинній обмотці дорівнює номінальному значенню, тобто $I_{1k} = I_{ном}$. Напругу короткого замикання прийнято виражати в процентах від номінальної напруги $U_{ном}$:

$$u_k = (U_k/U_{ном})100\%. \quad (3.20)$$

Як правило $u_k = (5, 12) \%$.

Магнітний потік Φ_{max} пропорційний напрузі U_1 , але, так як напруга короткого замикання не перевищує 5-12% від $U_{ном}$, то для створення головного магнітного потоку при дослідженні короткого замикання вимагається настільки мала величина намагнічувального струму, що нею можна знехтувати.

Виходячи з цього, прийнято вважати магнітні втрати при дослідженні короткого замикання рівними нулю, а використовувану потужність короткого замикання P_k рівною потужності електричних втрат трансформатора при номінальному навантаженні трансформатора ($P_k = P_{е.ном}$). Коефіцієнт потужності при дослідженні короткого замикання:

$$\cos \varphi_k = P_k / (U_k I_{ном}). \quad (3.21)$$

Таким чином, дослідження холостого ходу та короткого замикання дають можливість експериментально визначити ряд важливих параметрів трансформатора: I_0 , $P_0 = P_{m,ук}$, $P_k = P_{е.ном}$, використовуючи які можна визначити ККД трансформатора.

3.2 Трифазні трансформатори

Для трансформації трьохфазного струму можна використати три однофазні трансформатори, що працюють як один агрегат. Але можна об'єднати три однофазних трансформатора в один трьохфазний апарат й при цьому досягнути економії матеріалів. Трифазні трансформатори виготовляють головним чином стержньовими.

3.2.1 Тристержеві трифазні трансформатори

Для магнітопроводу досить мати три стержні, які з конструктивних міркувань розміщують в одній площині. На кожному стержні трифазного трансформатора розміщують обмотки вищої й нижчої напруг однієї фази.

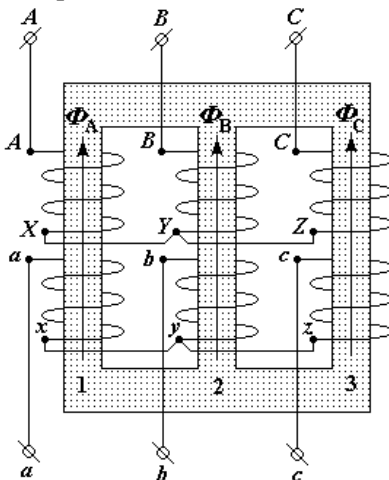


Рисунок 3.6 – Устрій трифазного трансформатора

Стержни з'єднуються між собою ярмом зверху і знизу. Довжина магнітних ліній потоку середнього стержня менша, ніж крайніх стержнів, отже, магнітний потік зустрічає на своєму шляху менший магнітний опір, ніж магнітні потоки крайніх стержнів.

Тому у фазі, обмотка якої розміщена на середньому стержні, протікає намагнічувальний струм меншої сили, ніж у фазах, обмотки яких розміщені на крайніх стержнях.

Конструктивно обмотки трифазних трансформаторів виконують так само, як і однофазних. Початки фаз вищої напруги позначають – А, В, С, а кінці фаз – Х, Y, Z. Якщо обмотка вищої напруги має виведену нульову точку, то цей затискач позначається цифрою 0. Початки фаз нижчої напруги позначають – а, в, с, а кінці фаз – х, у, z; вивід нульової точки – 0.

3.2.2 З'єднання обмоток трансформатора

Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані зіркою чи трикутником. З'єднання обмоток трифазних трансформаторів зіркою позначається Y, а трикутником Δ . Y – обмотка з'єднана зіркою і має виведену нульову точку. Групи трифазних трансформаторів позначаються знаками такого вигляду: Y/Y – 0; Y/ Δ – 11. Групи трифазних трансформаторів залежить від схем з'єднання обмоток, позначення затискачів фаз обмоток вищої і вищої напруг та від їх напрямку. В Україні застосовуються такі стандартні групи трифазних трансформаторів:

$$Y/Y - 0; \quad Y/\Delta - 11; \quad Y/\Delta - 11.). \quad (3.22)$$

Кут між однойменними лінійними ЕРС обмоток вищої і нижчої напруг визначає так звану групу з'єднання обмоток трансформатора. Величину цього кута прийнято умовно показувати числом, кожній одиниці якого відповідає 30° . Так для Y/ Δ маємо групу 11 ($330^\circ : 30^\circ = 11$), а для Y/Y маємо групу 12 ($360^\circ : 30^\circ = 12$). Прийнята система позначення груп з'єднання пов'язана з наочним зображенням зсуву фаз годинниковими стрілками циферблату (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Зображенням зсуву фаз годинниковими стрілками

Вектор лінійної ЕРС обмотки вищої напруги співпадає з хвилиною стрілкою, що показує на 12. Вектор ЕРС обмотки нижчої

напруги співпадає з годинною стрілкою. Тоді число, на яке вказує годинна стрілка, визначає групу з'єднання.

У стандартних схемах обмотки вищої напруги з'єднані зіркою, оскільки за такої схеми фазна напруга в $\sqrt{3}$ разів менша від лінійної, завдяки чому спрощується ізоляція обмоток. Обмотки нижчої напруги частіше з'єднують трикутником, бо за такого з'єднання трансформатор менш чутливий до не симетрії фазного навантаження. Обмотки нижчої напруги з'єднуються також зіркою з нулем; за такої схеми у чотирипровідній мережі можна одержати дві різні напруги – лінійну і фазну (наприклад, 127 і 220 В; 220 і 380 В і т. д.).

3.3 Автотрансформатори

Автотрансформатор – трансформатор, дві або більше обмоток якого мають спільну частину. Це є варіант виконання силового трансформатора, в якому первинна і вторинна обмотки сполучені безпосередньо, і мають за рахунок цього не тільки електромагнітний зв'язок, а й електричний. Обмотка автотрансформатора має декілька виводів (як мінімум 3), при підключенні до яких, можна отримувати різні напруги.

3.3.1 Класифікація автотрансформаторів

Автотрансформатори в залежності від типу обмотки и схеми включення можуть бути понижуючи та підвищувальні.

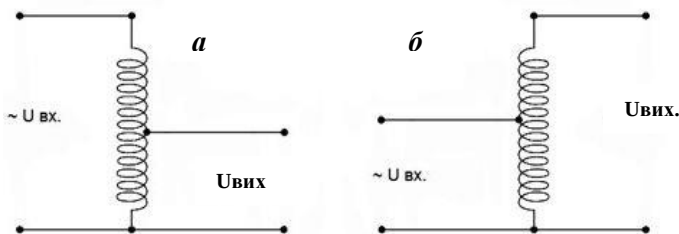


Рисунок 3.8 – Понижуючий (а) та підвищувальний (б) автотрансформатори

Існує окремий різновид автотрансформаторів, який дозволяє оперативно регулювати вихідну напругу за рахунок рухомого відведення – повзунок, Який можна пересувати по

обмотці (на зразок дротяним резисторам підлаштування). Такі автотрансформатора називають ручними регуляторами.

Регулювання напруги в широких межах при певній потужності навантаження забезпечується зміною коефіцієнта трансформації. Це здійснюється за рахунок переміщення по обмотці автотрансформатора контакту до якої підключена навантаження.

Автотрансформатор ЛАТР виконаний на тороїдальному магнітопроводі з навитої на ньому мідної обмоткою, що має відкриту (неізововану) доріжку, що забезпечує електричний контакт навантаження з обмоткою за допомогою ковзної вугільної щітки.

Всі моделі автотрансформаторів ЛАТР забезпечені шкалою повороту ручки регулятора, і вольтметром, що показує діюче значення вихідної напруги, розташованим на корпусі виробу.

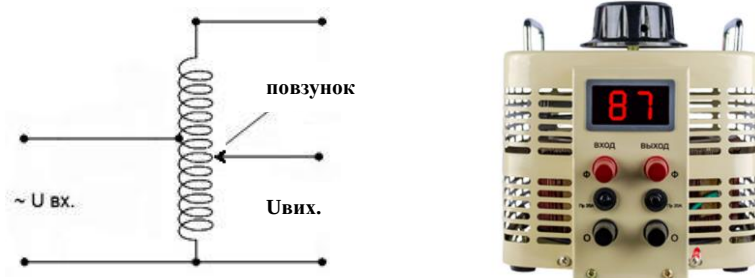


Рисунок 3.9. Схема і зовнішній вигляд автотрансформатора з ручним регулюванням напруги

Перевагою автотрансформатора є вищий ККД, оскільки лише частина потужності піддається перетворенню – це особливо суттєво, коли вхідна і вихідна напруги відрізняються незначно.

Недоліком є відсутність електричної ізоляції (гальванічної розв'язки) між первинним і вторинним колом.

Трифазний автотрансформатор. Трифазний автотрансформатор призначений для плавного регулювання напруги в трифазній мережі. Він забезпечений вимірювальною шкалою та вольтметром, що відображає вихідну напругу. На рис. 3.10. зображено схему електричну принципову звичайного трифазного трансформатора, а на рис. 3.11. загальний вигляд сучасного трифазного ЛАТРа TSGC2 9.

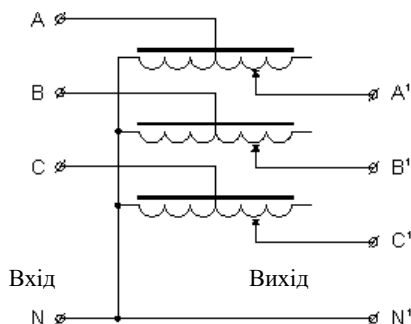


Рисунок. 3.10 – Схема трифазного автотрансформатора



Рисунок .3.11 – ЛАТР TSGC2 9.

TSGC2 9 – різновид автотрансформатора, в якому первинна і вторинна обмотки сполучені безпосередньо, частина витків належить одночасно первинної та вторинної ланцюгах.

3.3.2 Розрахунок автотрансформаторів

Розрахунок автотрансформатора здійснюють по даними напруг і потужності, споживаної навантаженням від електромережі.

При розрахунку (за спрощеними формулами), так само як і при розрахунку трансформатора, визначають струми, габаритну потужність (потужність, передану автотрансформатором), розміри сердечника, число витків і діаметр проводу секцій

обмотки. На рис 3.12. зображена електрична схема для допомоги розрахунку автотрансформатора.

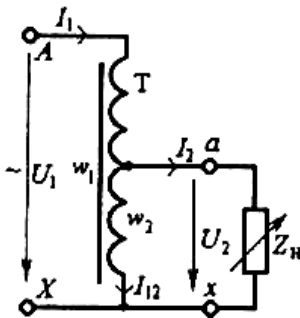


Рисунок 3.12 – Електрична схема автотрансформатора

Співвідношення напруг підпорядковується коефіцієнту трансформації.

$$I_1 \cdot \omega_1 = I_1 \cdot (\omega_1 - \omega_2) + I_{12} \cdot \omega_2, \quad (3.23)$$

де I_{10} – струм х/х первинної обмотки автотрансформатора;

I_{12} – струм вторинної обмотки автотрансформатора;

ω_1 – кількість витків первинної обмотки автотрансформатора;

ω_2 – кількість витків вторинної обмотки автотрансформатора;

Якщо знехтувати малою величиною струму I_{10} , то, то на ділянці з кількістю витків ω_2 , можна приблизно отримати:

$$I_{12} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} - 1 \right) \cdot I_1. \quad (3.24)$$

Аналізуючи формулу (3.22) можна зробити висновок, що I_{12} значно менший за I_2 (струм у навантаженні).

3.4 Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори підрозділяють на трансформатори струму та трансформатори напруги й використовують відповідно для перетворення великих змінних

струмів та напруг у відносно малі струми та напруги. Завдяки трансформатору струму можна використовувати прилади з невеликими стандартними номінальними значеннями струму та напруги (наприклад 5 А та 100 В) у високовольтних колах, по котрим протікають великі струми, до яких прикладена велика напруга (наприклад 25 А та 660 В).

Вимірювальні трансформатори складаються із двох ізольованих друг від друга обмоток, розміщенні на магнітопроводі: первинна з числом витків ω_1 й вторинна – з числом витків ω_2 .

3.4.1 Вимірювальний трансформатор напруги

Вимірювальний трансформатор напруги – знижувальний трансформатор, що дає змогу вимірювати значною напругу в мережах за допомогою електричних приладів з відносно невеликими границями вимірювань. Цей трансформатор зменшує величину напруги до безпечного рівня та ізолює електричну мережу, до якої приєднано первинну обмотку, від електричного кола, в яке ввімкнено вимірювальні прилади або їхні окремі кола (наприклад, кола напруги ватметрів, лічильників, фазометрів тощо).

У трансформаторах напруги і первинна, і вторинна обмотки мають значну кількість витків. У первинній кількості витків більша, ніж у вторинній, у стільки разів, у скільки разів напруга первинної обмотки більша за 100 В, бо номінальною напругою вторинної обмотки всіх трансформаторів напруги є саме 100 В. У багатьох таких трансформаторах вторинна обмотка має ще проміжний вивід, де напруга дорівнює 100/1,71 В.

Трансформатори напруги працюють у режимі, близькому до режиму холостого ходу, і величина опору, приєданого до його вторинної обмотки, повинна бути не меншою за величину, при якій споживана від вторинної обмотки трансформатора потужність (при напрузі 100 В) не перевищує номінальної потужності трансформатора, позначеної на його табличці.

Схему ввімкнення вимірювального трансформатора напруги з приладом для вимірювання напруги наведено на рис. 3.13.

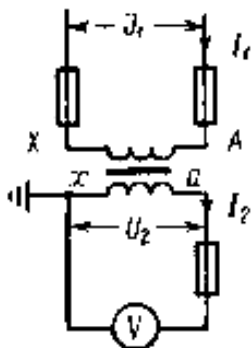


Рисунок 3.13 – Схема ввімкнення вимірювального трансформатора напруги

За показами приладів, включених до вторинної обмотки, можна визначити значення вимірювальних величин первинної обмотки, врахувавши коефіцієнт трансформації K_U :

$$K_U = U_1 / U_2. \quad (3.25)$$

Трансформатори напруги з двома вторинними обмотками, крім живлення вимірювальних приладів і реле, призначаються для роботи на пристроях сигналізації замикань на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю або на захист від замикань на землю в мережі з заземленою нейтраллю.

Схема трансформатора напруги з двома вторинними обмотками зображена на рис 3.14, а.

На рис. 3.14,б наведена схема включення трьох таких трансформаторів напруги в трифазній мережі. Первинні та основні вторинні обмотки з'єднані в зірку. Нейтраль первинної обмотки заземлена. На вимірювальні прилади і реле від основних вторинних обмоток можуть бути подані три фази і нуль. Додаткові вторинні обмотки з'єднані за схемою розімкнутого трикутника. Від них на пристрої сигналізації або захисту подається сума фазних напруг всіх трьох фаз.

При нормальній роботі мережі, в якій включений трансформатор напруги, ця векторна сума дорівнює нулю. Це видно з векторної діаграми рис. 3.14, в, де U_a , U_b і U_c вектори фазних напруг, прикладених до первинних обмоткам..

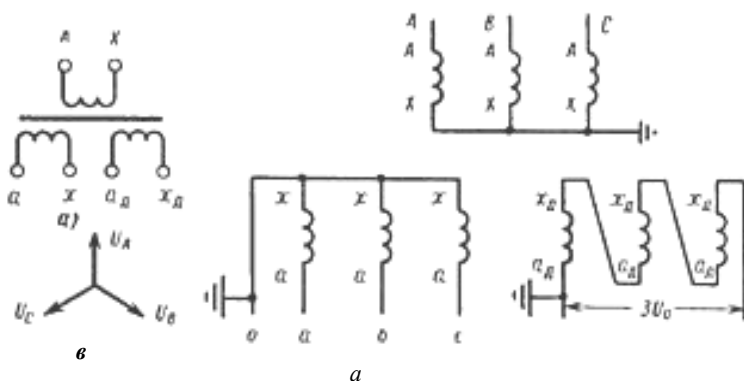


Рисунок 3.14 - Трансформатор напруги з двома вторинними обмотками:

a – схема, *б* –включення до трифазну ланцюг; *в* – векторна діаграма

3.4.2 Трансформатори струму

Трансформатори струму – знижувальні трансформатори, які призначені для ввімкнення а мережу амперметрів, струмових котушок ватметрів тощо.

Трансформатори струму виконуються у вигляді двообмоткового підвищувального трансформатора (рис.3.15), первинна обмотка якого вмикається послідовно у вимірювальне коло, або у вигляді прохідного трансформатора, у якого первинною обмоткою є провід, який проходить через вікно магнітопроводу.

За схемою включення у вимірювальні кола та умовам роботи трансформатори струму відрізняються від трансформаторів напруги.

Первинна обмотка трансформатору струму, виводи котрої позначаються літерами Л1, Л2 (лінія) включається послідовно.

До вторинної обмотки, виводи котрої позначаються літерами И1,И2 (вимірювання), послідовно підключають амперметри, струмові обмотки ватметрів, лічильників та інших приладів.

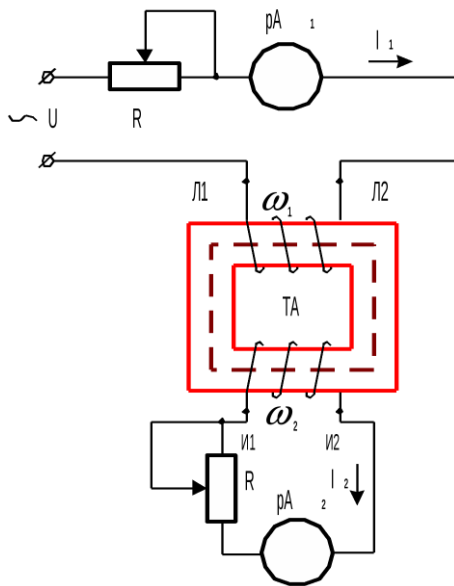


Рисунок 3.15 – Трансформатор струму

За показами приладів, включених до вторинної обмотки, можна визначити значення вимірювальних величин первинної обмотки, врахувавши коефіцієнт K_I трансформації:

$$K_I = I_1/I_2, \quad (3.26)$$

Номінальним режим трансформатора струму є – коротке замикання, через дуже малий внутрішній опір амперметра, який підключаємо до вторинної обмотки. Через наявність струму холостого ходу виникає деяка похибка при вимірюваннях, для зменшення якої магнітопроводи виконують великого поперечного перерізу (ненасичені) з високоякісної сталі.

Слід особливо підкреслити, що вторинну обмотку при роботі трансформатора струму неприпустимо розмикати або залишати розімкнутою перед ввімкненням, В цьому випадку трансформатор переходить в режим холостого ходу, при якому в десятки і навіть в сотні разів зростає магнітний потік, індукція і

втрати в етапі магнітопроводу трансформатор перегрівається і може згоріти. Але ще більшу небезпеку представляє різке підвищення напруги на затискачах вторинної обмотки. Якщо при номінальному робочому режимі (коротке замикання), то при переході в режим холостого ходу напруга може досягнути декількох сотень і навіть тисяч вольт, що представляє велику небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Для попередження випадкового режиму холостого ходу необхідно перед ввімкненням приладів замикає обмотку закоротко.



? Контрольні питання

1. Трансформатор – пристрій для ...
2. Що являє собою магнітна система трансформатора?
3. На чому ґрунтується принцип роботи трансформатора?
4. Якщо $k < 1$, трансформатор називається...
5. Якщо $k > 0$, трансформатор називається...
6. Робота трансформатора під навантаженням.
7. Як визначити ККД трансформатора?
8. В якій послідовності проводять дослідження холостого ходу трансформатора?
9. В якій послідовності проводять дослідження короткого замикання трансформатора?
10. Що можна використати для трансформації трьохфазного струму?
11. Які існують схеми з'єднань трифазних трансформаторів?
12. Автотрансформатор – це...
13. Які бувають автотрансформатори?
14. Які бувають вимірювальні трансформатори?

РОЗДІЛ 4

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМІВ

Електрична машина. Загальні відомості
Електричні машини постійного струму
Електричні машини змінного струму
Крокові електродвигуни

4.1 Електрична машина. Загальні відомості

Електрична машина – електромеханічний пристрій для перетворення механічної енергії на електричну чи електричної на механічну, або електричної енергії одного роду чи з одними параметрами на електричну енергію іншого роду або з іншими параметрами.

Дія електричної машини ґрунтується на електромагнітній індукції і законах, що визначають механічні сили взаємодії електричного струму і магнітних полів.

Електричні машини є основними елементами електричних установок. Вони використовуються як джерела (генератори) електричної енергії, як двигуни, щоб приводити в рух нарізноманітніші робочі механізми на заводах і фабриках, в сільському господарстві, на будівельних роботах тощо.

Електричні машини застосовуються також для перетворення роду струму (наприклад, змінного струму в постійний), частоти і числа фаз змінного струму, постійного струму одного напруги в постійний струм іншої напруги. Такі машини називаються електромашинними перетворювачами.

За призначенням електричні машини поділяють на двигуни і генератори.

Двигуни – машини, які перетворюють електричну енергію в механічну.

Генератори – машини, які перетворюють механічну енергію в електричну.

Будь-яка електрична машина може працювати у режимі як двигуна, так і генератора.

За видом струму електричні машини поділяють – на машини постійного і змінного струму.

За принципом роботи електричні машини змінного струму можуть бути синхронні та асинхронні.

4.4.1 Класифікація за призначенням

Електричні машини за призначенням поділяють на такі види:

- *електромашинні генератори*, що перетворюють механічну енергію в електричну. Їх встановлюють на електричних станціях і різних транспортних засобах: автомобілях, літаках, тепловозах, кораблях, пересувних електростанціях тощо. На електростанціях вони приводяться в обертання за допомогою могутніх парових і гідравлічних турбін, а на транспортних установках – від двигунів внутрішнього згоряння і газових турбін. У ряді випадків генератори використовують як джерела живлення в установках зв'язку, пристроях автоматики, вимірювальної техніки й інше;

- *електричні двигуни*, що перетворюють електричну енергію в механічну; вони приводять в обертання різні машини, механізми і пристрої, застосовувані в промисловості, сільському господарстві, зв'язку, на транспорті, у військовій справі і побуті. У сучасних системах автоматичного керування їх використовують як виконавчі (силові) або регулюючі (інформаційні);

- *електромашинні перетворювачі*, що перетворюють змінний струм у постійний і, навпаки, що змінюють величину напруги змінного і постійного струму, частоту, число фаз і інше. Їх широко використовують у промисловості, на транспорті й у військовій справі, хоча в останнє десятиліття роль електромашинних перетворювачів істотно зменшилась внаслідок застосування статичних напівпровідникових перетворювачів;

- *електромашинні компенсатори*, що здійснюють для генерування реактивної потужності в електричних установках покращення енергетичних показників джерел і приймачів електричної енергії;

- *електромашинні підсилювачі*, які використовуються для керування об'єктами великої потужності за допомогою

електричних сигналів малої потужності, що подаються на їхні обмотки збудження (управління). Роль електромашинних підсилювачів останнім часом також зменшилася через широке застосування підсилювачів, виконаних на напівпровідникових елементах (транзисторах, тиристорах);

- *електромеханічні перетворювачі сигналів* – генерують, перетворюючи й підсилюючи різні сигнали. Їх виконують звичайно у виді електричних мікромашин і широко застосовують у системах автоматичного регулювання, вимірювальних і лічильно-вирішальних пристроях як різні датчики, елементи, що диференціюють, інтегрують, порівнюють і регулюють тощо.

4.1.2 Класифікація за родом струму і принципом дії

Електричні машини за родом струму поділяють на машини змінного і постійного струму. Машини змінного струму залежно від принципу дії й особливостей електромагнітної системи підрозділяють на трансформатори, асинхронні, синхронні і колекторні машини.

Трансформатори широко застосовують для перетворення напруги: у системах передачі і розподілу електричної енергії, у випрямних установках, пристроях зв'язку, автоматики й обчислювальної техніки, а також при електричних вимірах (вимірювальні трансформатори) і функціональних перетвореннях (обертові трансформатори).

Асинхронні машини використовують головним чином як електричні двигуни трифазного струму. Простота пристрою і висока надійність дозволяють застосовувати їх у різних галузях техніки для приводу верстатів, вантажопідіймних і землерийних машин, компресорів, вентиляторів та інших механізмів. У системах автоматичного регулювання широко використовують однофазні і двофазні виконавчі асинхронні двигуни, асинхронні тахогенератори, а також сельсини.

Синхронні машини застосовують як генератори змінного струму промислової частоти на електричних станціях і як генератори підвищеної частоти в автономних джерелах живлення (на кораблях, літаках і таке інше). В електричних приводах великої потужності застосовують також синхронні

електродвигуни. У пристроях автоматики широко використовують різні синхронні машини малої потужності (реактивні, з постійними магнітами, гістерезисні, крокові, індукторні й інші).

Колекторні машини змінного струму використовують порівняно рідко і головним чином як електродвигуни. Вони мають складну конструкцію і вимагають ретельного догляду. У пристроях автоматики, а також у різного роду електропобутових приладах застосовують універсальні колекторні двигуни, що працюють як на постійному, так і на змінному струмі.

Машини постійного струму застосовують як генератори й електродвигуни у пристроях електроприводу, що вимагають регулювання частоти обертання в широких межах:

- залізничний і морський транспорт;
- прокатні стани;
- електротрансмісії великовантажних автомобілів; вантажопідйомні і землерийні машини;
- складні металообробні верстати й інші, а також у тих випадках, коли джерелами електричної енергії для живлення електродвигунів служать акумуляторні батареї (стартерні двигуни, двигуни підводних човнів, космічних кораблів і таке інше).

Генератори постійного струму часто застосовують для живлення пристроїв зв'язку, зарядки акумуляторних батарей, як основні джерела живлення на транспортних установках (автомобілях, літаках, тепловозах, пасажирських вагонах). Однак останнім часом генератори постійного струму замінюються генераторами змінного струму, що працюють разом з напівпровідниковими випрямлячами.

У системах автоматичного регулювання машини постійного струму широко використовують як електромашинні підсилювачі, виконавчі двигуни і тахогенератори.

Залежно від призначення електричні мікромашини автоматичних пристроїв підрозділяються на такі групи:

- *силові мікродвигуни*, що приводять в обертання різні механізми автоматичних пристроїв, самописних приладів та інше;

- *керовані (виконавчі) двигуни*, що перетворюють підведений до них електричний сигнал у механічне переміщення вала, тобто визначені команди, що відпрацьовують;

- *тахогенератори*, що перетворюють механічне обертання вала в електричний сигнал – напругу, пропорційну частоті обертання вала;

- *поворотні (обертові) трансформатори*, що дають на виході напругу, пропорційну тій чи іншій функції кута повороту ротора, наприклад синусу чи косинусу кута чи самому куту;

- *машини синхронного зв'язку* (сельсини, магнесини), що здійснюють синхронний і синфазний поворот чи обертання декількох механічно не пов'язаних між собою осей;

- *мікромашини гіроскопічних приладів* (гіроскопічні двигуни, датчики кута, датчики моменту), що здійснюють обертання роторів гіроскопів з високою частотою і корекцію їхнього положення;

- *електромашинні перетворювачі і підсилювачі.*

- Шагові електродвигуни.

Електричні мікромашини перших двох груп часто називають *силовими*, а третьої – п'ятої груп – *інформаційними*.

4.1.3 Класифікація за потужністю

Електричні машини за потужністю умовно підрозділяють на мікромашини, машини малої, середньої і великої потужності.

Мікромашини мають потужність від часток вата до 500 Вт. Ці машини працюють як на постійному, так і на змінному струмі нормальної і підвищеної (400–2000 Гц) частоти.

Машини малої потужності – від 0,5 до 10 кВт. Вони працюють як на постійному, так і на змінному струмі нормальної чи підвищеної частоти.

Машини середньої потужності – від 10 кВт до декількох сотень кіловатів.

Машини великої потужності – понад декілька сотень кіловатів. Машини великої і середньої потужності звичайно

призначають для роботи на постійному чи змінному струмі нормальної частоти.

4.1.4 Класифікація за частотою обертання

Електричні машини за частотою (швидкістю) обертання умовно підрозділяють на такі:

- *тихохідні* – з частотами обертання до 300 об/хв;
- *середньої швидкохідності* – 300-1500 об/хв;
- *швидкохідні* – 1500-6000 об/хв;
- *надшвидкохідні* – понад 6000 об/хв.

Мікромашини виконують для частот обертання від декількох обертів у хвилину до 60000 об/хв; машини великої і середньої потужності – звичайно до 3000 об/хв.

4.2 Електричні машини постійного струму

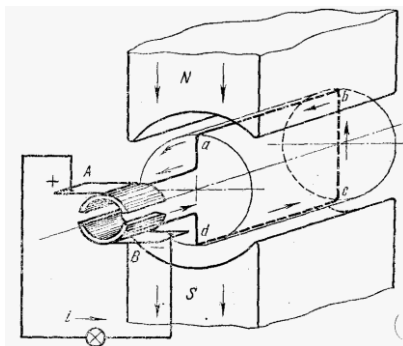
Машина постійного струму – це електрична машина, призначена для перетворення механічної енергії в електричну постійного струму (генератор) або для зворотного перетворення (двигун).

Машина постійного струму оборотна, тобто конструкція електродвигуна постійного струму така сама, як і генератора постійного струму.

В електродвигуні явище електромагнітної індукції при взаємодії струму обмотки ротора (якоря) з основним магнітним полем зумовлює появу електромагнітного обертового моменту.

Для генератора постійного струму ґрунтується на явищі електромагнітної індукції – збудженні змінної електрорушійної сили в обмотці ротора (якоря), при його обертанні в основному магнітному полі, створюваному обмоткою збудження на полюсах.

Процес роботи найпростішої машини постійного струму колекторного типу (рис. 4.1) у режимі генератора відбувається у такий спосіб.



Риунок 4.1 – Найпростіша модель машини постійного струму

Між двома полюсами постійного магніту (N і S) поміщена обертова частина машини – якір. Для обертання якоря використовується механічна сила первинного двигуна, наприклад турбіни чи двигуна внутрішнього згоряння. Якір машини складається зі сталевго циліндра, на якому розташована обмотка у вигляді витка $abcd$, кінці витка приєднані до двох пластин (півкільцьям), закріпленим на валу й ізольованими одна від одної. Ці пластини утворюють важливу частину машини – колектор. До щіток A і B приєднане навантаження генератора. У процесі роботи машини колектор обертається разом з валом, а щітки A і B залишаються нерухомими.

Припустимо, що якір генератора обертається проти руху годинникової стрілки, тоді в провідниках обмотки якоря індукуються ЕРС, напрямом якої зазначений на рисунку стрілками. Миттєве значення цієї ЕРС для одного провідника обмотки визначається формулою:

$$e = \text{const} \cdot B.$$

4.2.1 Двигуни постійного струму

Будова машин постійного струму (генераторів і двигунів) у спрощеному вигляді зображено на рис. 4.1. До сталевго

корпусу 1 статора машини прикріплені головні 2 і додаткові 4 полюси. На головних полюсах розташована обмотка збудження 3, на додаткових – обмотка додаткових полюсів 5. Обмотка збудження створює магнітний потік Φ машини.

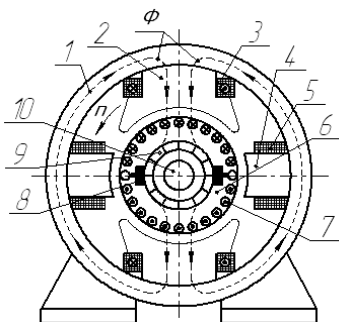


Рисунок 4.2 – Конструкція машини постійного струму

На валу 10 двигуна закріплений циліндричний магнітопровід 6, у пазах якого розташована обмотка якоря 7. Секції обмотки якоря приєднані до колектора 9. До нього ж притискаються пружинами нерухомі щітки 8.

Закріплений на валу двигуна колектор складається з ряду ізолюваних від нього і один від одного мідних пластин.

За допомогою колектора, і щіток здійснюється з'єднання обмотки якоря з зовнішньої електричної ланцюгом. У двигунів вони, крім того, служать для перетворення постійного по напрямку струму зовнішньої ланцюга в змінюється по напрямку струм у провідниках обмотки якоря.

Додаткові полюси з розташованої на них обмоткою зменшують іскріння між щітками й колектором машини. Обмотку додаткових полюсів з'єднують послідовно з обмоткою якоря і на електричних схемах часто не зображують.

Для зменшення втрат потужності магнітопровід якоря виконаний з окремих сталевих листів. Всі обмотки виготовлені з ізолюваного проводу.

Крім двигунів, що мають два головних полюси, існують машини постійного струму з чотирма і більшою кількістю головних полюсів.



Рисунок 4.3– Якір двигуна постійного струму

При цьому відповідно збільшується кількість додаткових полюсів і комплектів щіток. Якщо двигун включений в мережу постійної напруги, то при взаємодії магнітного поля, створеного обмоткою збудження, і струму в провідниках якоря виникає обертаючий момент, що діє на якір:

$$M = k_M \cdot \Phi \cdot I_A , \quad (4.1)$$

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot n , \quad (4.2)$$

де K_M – коефіцієнт, що залежить від конструктивних параметрів машини; Φ – магнітний потік одного полюса; I_A – струм якоря.

Якщо момент двигуна при $n = 0$ перевищує гальмуючий момент, яким навантажений двигун, то якір почне обертатися. При збільшенні частоти обертання n зростає ЕРС, що індукуються в якірній обмотці.

Це призводить до зменшення струму якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{r_{\text{я}}} = \frac{U - k_e \Phi n}{r_{\text{я}}}, \quad (4.3)$$

де $r_{\text{я}}$ – опір якоря.

Напрямок моменту двигуна і, отже, напрямок обертання якоря залежать від напрямку магнітного потоку і струму в провідниках обмотки якоря. Щоб змінити напрямок обертання двигуна, слід змінити напрямок струму якоря або струму збудження.

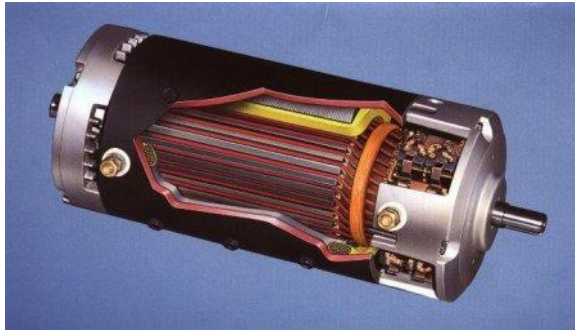


Рисунок 4.4 – Двигун постійного струму

4.2.2.1 Класифікація двигунів постійного струму за способом збудження

Властивості і характеристики двигунів постійного струму істотно залежать від того, як змінюється магнітний потік двигунів при зміні їхнього механічного навантаження. Характер зміни магнітного потоку залежить у свою чергу від числа і способу вмикання обмоток збудження, тобто від способу збудження.

В залежності від способу збудження двигуни підрозділяються аналогічно генераторам на двигуни із незалежним, паралельним, послідовним і змішаним збудженням. Схеми двигунів і генераторів з однаковим видом збудження однакові (рис. 4.5).

На практиці застосування знаходять двигуни всіх вище вказаних способів збуджень.

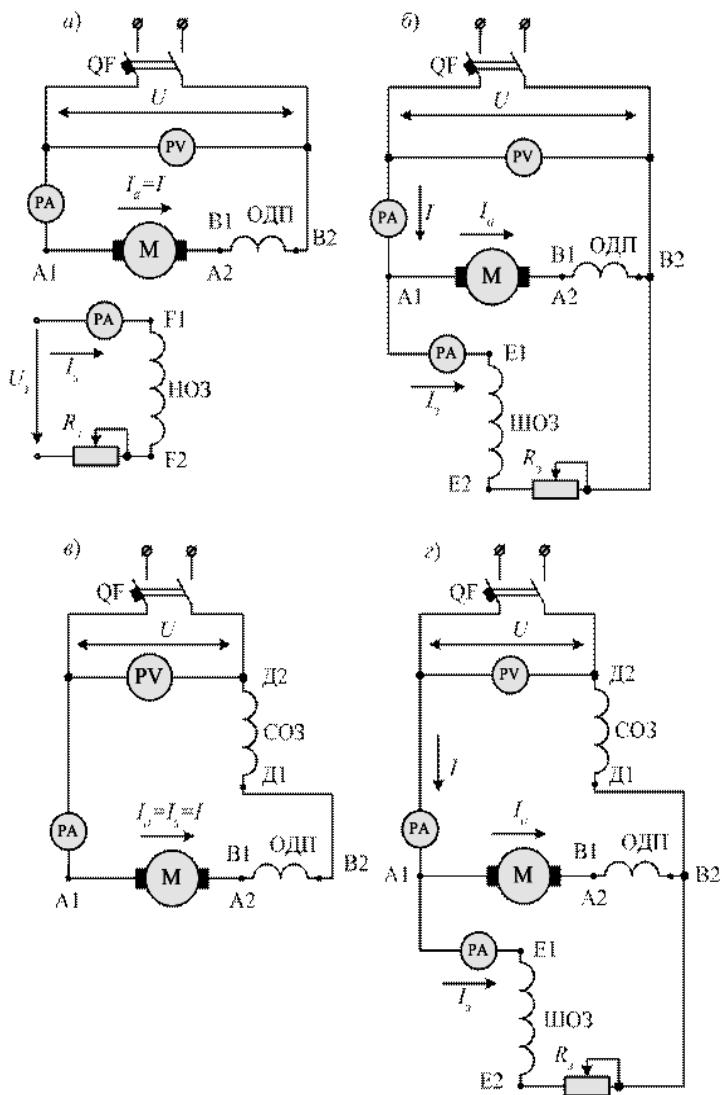


Рисунок 4.5 – Схеми двигунів постійного струму: з незалежним (а), паралельним (б), послідовним (в) і змішаним (г) збудженням

4.2.2.2 Пуск двигунів

З формули (4.3) випливає, що в першу мить після включення двигуна в мережу постійної напруги, тобто коли $n = 0$,

$$\begin{aligned} E &= k_e \Phi n = 0, \\ I_{\text{я}} &= \frac{U}{r_{\text{я}}}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Так як опір $r_{\text{я}}$ невеликий, то струм якоря може в 10 ... 30 разів перевищувати номінальний струм двигуна, що неприпустимо, оскільки призведе до сильного іскріння і руйнування колектора. Крім того, при такому струмі виникає неприпустимо великий момент двигуна, а при частих пусках можливий перегрів обмотки якоря.

Щоб зменшити пусковий струм в ланцюзі якоря, включають пусковий резистор, опір якого в міру збільшення частоти обертання двигуна зменшують до нуля. Якщо пуск двигуна автоматизований, то пусковий резистор виконують з декількох ступенів, які вимикають послідовно в міру збільшення частоти обертання. Пусковий струм якоря:

$$I_{\text{яп}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}} + r_{\text{д}}}. \quad (4.5)$$

У міру розгону двигуна в обмотці якоря зростає ЕРС, а як випливає з формули (4.3), це призводить до зменшення струму якоря $I_{\text{я}}$. Тому в міру збільшення частоти обертання двигуна опір в ланцюзі якоря зменшують. Щоб при порівняно невеликому пусковому струмі отримати великий пусковий момент, пуск двигуна здійснюють з найбільшим магнітним потоком. Отже, струм зрушення при пуску повинен бути максимально допустимим.

4.2.2.3 Технічні дані двигунів

У паспорті двигуна та довідкової літератури на двигуни постійного струму вказані наступні технічні дані: номінальні напруга U_n , потужність P_n , частота обертання n_n , струм I_n , ККД.

Під номінальним U_n розуміють напругу, на яку розраховані обмотка якоря і колектор, а також у більшості випадків і паралельна обмотка збудження.

Номінальний струм I_n – максимально допустимий струм (споживаний з мережі), при якому двигун нагрівається до найбільшої допустимої температури, працюючи в тому режимі (тривалому, повторно-короткочасному, короткочасному), на який розрахований:

$$I_H = I_{яH} + I_{вн} , \quad (4.6)$$

де $I_{яH}$ – струм якоря при номінальному навантаженні; $I_{вн}$ – струм обмотки збудження при номінальній напрузі.

Слід зазначити, що струм збудження $I_{вн}$ двигуна паралельного збудження порівняно малий, тому при номінальному навантаженні зазвичай приймають%

$$I_{яH} = I_H .$$

Номінальна потужність P_n – потужність, що розвивається двигуном на валу при роботі з номінальним навантаженням (моментом) і при номінальній частоті обертання n_n .

Частота обертання n_n , і ККД відповідають роботі двигуна зі струмом I_n , напругою U_n без додаткових резисторів у ланцюгах двигуна.

У загальному випадку потужність на валу P_2 , момент M , частота обертання n пов'язані співвідношенням:

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9550} . \quad (4.7)$$

Споживана двигуном з мережі потужність P_1 , величини P_2 , ККД, U , I зв'язані співвідношеннями:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.8)$$

$$P_1 = UI, \text{ де } I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}.$$

Очевидно, що ці співвідношення справедливі також і для номінального режиму роботи двигуна.

4.2.2.4 ККД двигунів постійного струму

Коефіцієнт корисної дії є найважливішим показником двигунів постійного струму. Чим він більший, тим нижча вихідна потужність P і струм I , споживані двигуном з мережі при одній і тій же механічній потужності. У загальному вигляді залежність $\eta(P_2)$ така:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}}}, \quad (4.9)$$

де

$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}$ – втрати в обмотці якоря;

$\Delta P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 r_{\text{в}}$ – втрати в обмотці збудження;

$\Delta P_{\text{с}}$ – втрати обмотці якоря;

$\Delta P_{\text{мех}}$ – механічні втрати.

Втрати потужності $\Delta P_{\text{в}}$ не залежать, $\Delta P_{\text{с}}$ і $\Delta P_{\text{мех}}$ мало залежать від навантаження двигуна.

Двигуни розраховуються таким чином, щоб максимальне значення ККД було в області, близької до номінальної потужності. Експлуатація двигунів при малих навантаженнях небажана внаслідок малих значень η .

Значення ККД двигунів з різними способами збудження і потужністю від 1 до 100 кВт при номінальному навантаженні різні і складають у середньому 0,8.

4.2.3 Генератори постійного струму

Генератором постійного струму називають обертову електричну машину, яка перетворює механічну енергію в електричну енергію постійного струму. Нерухома частина машини постійного струму – статор (індуктор), обертова частина – ротор (якір). Магнітний потік у генераторі постійного струму створюється його полюсами, тобто електромагнітами, що складаються з осердя та обмоток.

Залежно від того, як джерело живить струмом ці обмотки, генератори поділяються на генератори незалежного збудження та генератори з самозбудженням.

Перші повинні мати стороннє джерело постійного струму для живлення обмотки збудження. Для цієї мети може застосовуватись випрямляч або інше джерело постійного струму.

Генератори з самозбудженням – це машини, в яких для збудження використовується частина енергії, яку вони самі виробляють. За способом використання обмотки збудження розрізняють генератори паралельного, послідовного та мішаного збудження.

Основними частинами генератора (рис. 4.6) є станина 1, осердя полюсів 8, обмотка полюсів (обмотка збудження) 7, якір 5 (осердя з обмоткою), колектор 2, підшипникові щити 3 і 9 (передній і задній), траверса 4 з щіткотримачами та щітками. На валу якоря закріплено вентилятор б.

Станина 1 – це литий або зварений циліндр, виготовлений з чавуну або сталі з високою магнітною провідністю. Вона є магнітопроводом, а також основою для кріплення головних і додаткових полюсів, підшипникових щитів, вивідних затискачів на клемному щитку.

Підшипникові щити 3 і 9 прикріплюють болтами до торців станини. На підшипниках, вставлених в отвори щитів, обертається вал якоря.

Якір 5 складається з осердя, обмотки і колектора. Осердя якоря (ротора) – це сталевий циліндр, складений з окремих штампованих листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного для зменшення вихрових струмів. На поверхні осердя є пази, в які вкладають обмотку якоря.

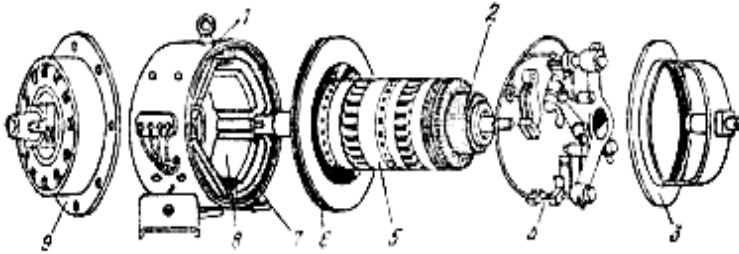


Рисунок 4.6 – Генератор постійного струму в розібраному вигляді

Колектор (рис. 4.7.) складається з окремих пластин 4 клиновидної форми, виготовлених з міді. Вони ізолювані одна від одної слюдою. До кожної колекторної пластини

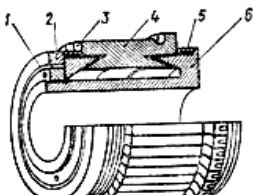


Рисунок 4.7 – Колектор:
1- гайка; 2 – натискний конус;
3– конус міканітів; 4 – колекторні пластинки; 5 – бандаж; 6 - втулка

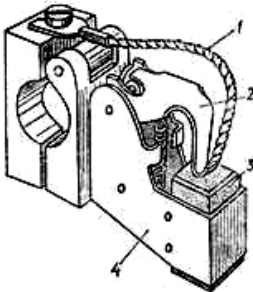


Рисунок 4.8 – Щіткотримач:
1 – пружина; 2 – пружина;
3 – щітка; 4- щіткотримач

У машинах постійного струму найчастіше застосовують петльові й хвильові обмотки. Секція (рис. 4.9) – це частина

обмотки якоря, що складається з одного або кількох витків і міститься між двома колекторними пластинами. Активні сторони секції розміщують одну від одної на відстані полюсного кроку t . Секції старанно ізолюють і просочують ізоляційним лаком. Перед укладанням обмотки пази якоря також ізолюють.

Укладання обмотки в пази якоря показано на рис. 4.8. Укладену обмотку закріплюють у пазах дерев'яними клинами. Кінці секцій припаюють до виступів колекторних пластин, які називають півниками. На лобові частини обмотки для закріплення останніх накладають бандажі.

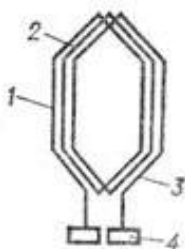


Рисунок. 4.9 – Секція обмотки якоря:

1 – активні провідники, що лежать у пазах; 2 – задня лобова частина; 3 – передня лобова частина; 4 – колекторні пластинки;

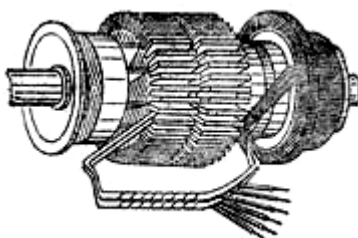


Рисунок 4.10 –
Укладання обмотки в
пази якоря

Обмотка має відповідати таким вимогам: бути замкненою і розподіленою щітками на парне число ділянок однакової довжини: $E.P.C.$, які індукуються в усіх провідниках однієї ділянки, повинні додаватися: $e.p.c.$ сусідніх ділянок мають бути однакові й напрямлені одна проти одної так, щоб сумарна $e.p.c.$ дорівнювала нулю і не утворювалися зрівняльні струми.

Генератори із самозбудженням у свою чергу, підрозділяються на такі види:

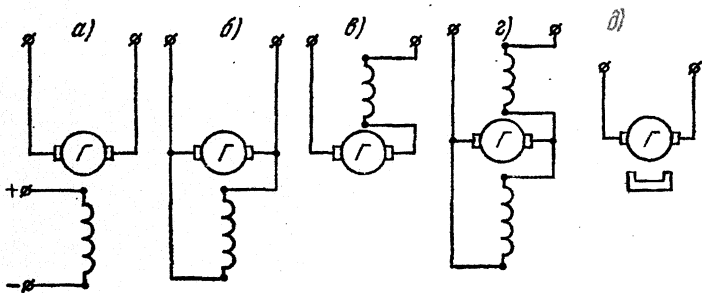


Рисунок. 4.11 – Принципові схеми генераторів постійного

а) генератори паралельного збудження (шунтові), у яких обмотка збудження приєднана до затисків обмотки якоря паралельно навантаженню (рис. 4.11, б);

б) генератори послідовного збудження (серієсні), у яких обмотка збудження приєднана послідовно до обмотки якоря (рис. 4.11, в);

в) генератори змішаного збудження (компаундні), що мають, дві обмотки збудження: одну – включену паралельно, а іншу – послідовно (рис. 4.11, г).

Генератори зі збудженням постійними магнітами не мають обмотки збудження (рис. 4.11, д), тому що їхні головні полюси виготовляються у вигляді постійних магнітів.

У процесі роботи генератора постійного струму в його якірній обмотці наводиться ЕРС. При підключенні до генератора навантаження в ланцюзі якоря виникає струм, а на виводах генератора встановлюється напруга:

$$U = E_a - I_a \sum r, \quad (4.10)$$

де $\sum r$ являє собою суму опорів усіх ділянок ланцюга якоря. У загальному вигляді цей опір:

$$\sum r = r_a + r_\partial + r_k + r_c + r_{щ}, \quad (4.11)$$

тобто він складається з опорів: обмотки якоря r_a , обмотки додаткових полюсів r_∂ , компенсаційної обмотки r_k , r_c – послідовної обмотки збудження і $r_{щ}$ – перехідного щіткового контакту. При відсутності в машині якої-небудь із зазначених обмоток у формулу (4.11) не входять відповідні доданки.

4.2.3.1 Основні характеристики двигунів постійного струму

Для практичного застосування двигуна основною є його механічна характеристика, яка визначає залежність частоти обертання якоря від, що розвивається їм моменту на валу. У двигуна з незалежним збудженням магнітний потік не залежить від струму якоря. Якби в такого двигуна опору обмотки якоря й щіткових контактів r_Σ стали дорівнюють нулю, то Е.Р.С., що розвивається в обмотці якоря – виявилася б рівної напрузі мережі. Через це двигун при будь-якій навантаженню мав би ту саму частоту обертання і його механічна характеристика була б горизонтальною (суцільна лінія на рис. 4.12,а).

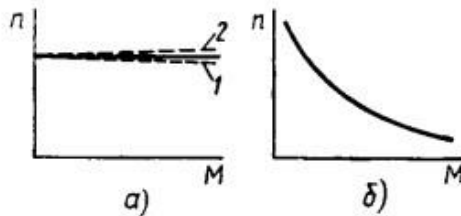


Рисунок 4.12 – Механічні характеристики двигунів постійного струму

При відмінних від нуля значеннях опору якоря r_Σ е.р.с. з ростом струму якоря, а отже, і моменту на валу, трохи

зменшується. Через це механічна характеристика такого двигуна являє собою спадну лінію, тобто має невеликий негативний нахил (штрихова лінія 1 на рис. 4.12,а).

Разом з тим реакція якоря призводить до зниження е.р.с., що наводиться в якорі, при росту струму якоря й пропорційного йому моменту на валу. Тому частота обертання якоря машини, у якій діє цей фактор, повинна рости зі збільшенням моменту навантаження (штрихова лінія 2 на рис. 4.12, а). У реальній машині діють обоє названих фактора і її механічна характеристика може мати, як невеликий негативний, так і невеликий позитивний нахил.

Механічна характеристика двигуна з паралельним збудженням в основному повторює характеристику двигуна з незалежним збудженням, тому що струм у його обмотці збудження постійний, оскільки визначається постійною напругою мережі й опором обмотки збудження.

Механічна характеристика двигуна з послідовним порушенням (рис. 4.12,б) більш «м'яка», тобто частота обертання його якоря різко знижується при зростанні моменту на валу (механічного навантаження).

Зв'язане це з тим, що при великій навантаженні струм якоря I_a великий і значна частина напруги, підведеного до двигуна, падає на опорі обмотки збудження. е.р.с, що розвивається в обмотці якоря, повинна врівноважувати різницю $U - I_{a\gamma}r$, а для потрібна невелика частота обертання якоря, тому що необхідна е.р.с. невелика, а магнітний потік, обумовлений струмом I_a , великий. Разом з тим при відсутності навантаження (момент і струм якорі малі) частота обертання може виявитися дуже великою.

У двигунів зі змішаним збудженням механічні характеристики є проміжними між характеристиками двигунів з послідовним і паралельним збудженням.

4.2.3.2 Основні характеристики генераторів постійного струму

Зовнішня характеристика генератора постійного струму визначає залежність напруги, що знімається з його щіток, від

струму навантаження якоря при постійній швидкості обертання якоря. Вид зовнішньої характеристики залежить від способу збудження машини. У генератора з незалежним збудженням (його магнітний потік може створюватися й постійним магнітом) зовнішня характеристика досить полого (рис. 4.13).

Напруга на її виході відрізняється від індуктивної у якорі е.р.с. лише через спадання напруги, створюваної струмом якоря I_a на відносному малому опорі його обмотки r_0 і опорі контактів щіток $r_{щ}$. Прийнято, що $r_a = r_0 + r_{щ}$.

Якби е.р.с., індуктивна в якорі, не залежала від струму якоря, то зовнішня характеристика генератора з незалежним збудженням була б лінійною. Однак через реакцію якоря з ростом струму якоря, що наводиться в його обмотці е.р.с. зменшується. Через це зовнішня характеристика генератора з незалежним збудженням нелінійна і її нахил завжди більший значення r_a .



Рисунок 4.13 – Зовнішня характеристика генераторів постійного струму

Зовнішня характеристика генератора з паралельним збудженням на початковій ділянці (рис. 4.13) спадає з ростом струму якоря трохи швидше, ніж у генератора з незалежним збудженням. Це пов'язано з тим, що потік збудження такого генератора залежить від струму збудження, пропорційного напрузі на щітках U , дещо меншій, ніж е.р.с. E :

$$I_z = U/r_z = (E - I_a r_a) / r_z, \quad (4.12)$$

де r_3 – опір обмотки збудження; $I_a = I_3 + I_n$ – струм якоря генератора.

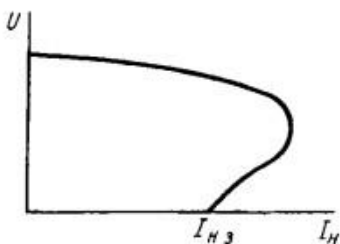


Рисунок 4.14 – Зовнішня характеристика генератора з паралельним збудженням на початковій ділянці

Особливістю генератора з паралельним збудженням є відносно невеликий струм короткого замикання. Зі зменшенням опору навантаження струм якоря спочатку росте, напруга на щітках падає й це приводить до зменшення струму порушення й е.р.с. якоря. Такі генератори мають найбільше поширення, тому що вони мають досить полого зовнішню характеристику й не вимагають додаткового джерела для збудження.

У генераторі з послідовним збудженням зовнішня характеристика має дзвіноподібну форму (рис. 4.13), тому що при холостому ході її потік порушення малий ($I_3 = I_n = 0$), а при більших струмах навантаження вся е.р.с. гаситься опором обмотки збудження.

Така зовнішня характеристика досить незручна для живлення звичайних навантажень і тому генератор з послідовним збудженням практично не застосовують.

У генераторів зі змішаним збудженням послідовна обмотка може бути включена так, що загальний магнітний потік збудженням збільшується з ростом струму якоря. Збільшення потоку приводить до росту Е.Р.С. якоря й напруга, що знімається із щіток такого генератора, може навіть рости при збільшенні струму навантаження. Генератори з незалежним збудженням, створюваним постійним магнітом, використовують як тахогенератори, тобто машини, що створюють напругу, прямо пропорційне частоті обертання.



Рисунок 4.15 – Зовнішня характеристика генератора з послідовним збудженням

4.3 Електричні машини змінного струму

Електричні машини змінного струму – це насамперед електродвигуни та електрогенератори. Основними частинами машини змінного струму є статор і ротор. Їх, як і сердечник трансформатора, набирають із тонких ізольованих пластин електротехнічної сталі (рис. 4.16). Статор електричних двигунів змінного струму являє собою осердя (магнітопровід) з листів електротехнічної сталі, у якому зроблено отвори (пази) для розміщення обмотки (фрагмент магнітопроводу статора подано на рис. 4.16).

Обмотка складається з окремих секцій (катушок, рамок). Усередині статора на підшипниках розташований ротор, спроможний вільно обертатися відносно своєї осі.



Рисунок 4.16 – Загальний вигляд двигуна змінного струму

Відповідно до принципу оборотності та сама машина може працювати і як генератор, і як двигун.

4.3.1 Однофазний асинхронний двигун

Асинхронний двигун – це електродвигун змінного струму, робота якого базується за рахунок обертання магнітного поля, що створюється струмом обмоток статора, при цьому дана частота обертання не збігається (асинхронна) з частотою обертання магнітного поля ротора двигуна (від чого і назва). Це найбільш поширена електрична машина, яка перетворює електричну енергію в механічну.

Однофазні асинхронні двигуни – це звичайні двигуни невеликої потужності, які широко використовуються в пристроях автоматики і різних побутових приладах. За конструкцією вони майже не відрізняються від трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Різниця полягає в тому, що на сердечнику статора однофазного двигуна укладена однофазна обмотка, яка займає 2/3 пазів сердечника.

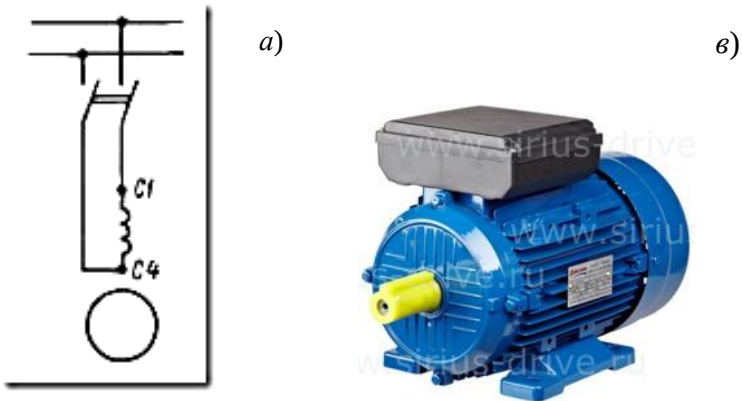


Рисунок 14.17 – Однофазний асинхронний двигун:
а – однофазна обмотка статора, б – загальний вигляд

При ввімкненні однофазної обмотки статора С1- С4 в мережу (рис. 14.17) змінний струм, що проходить по обмотці, створює пульсуючий магнітний потік, нерухомий в просторі, але змінний від $+\Phi_{max}$ до $-\Phi_{max}$.

Для пояснення принципу дії однофазного асинхронного двигуна використаємо графічний метод розкладання пульсуючого магнітного потоку на два однакових, рівних $\Phi_{max}/2$, магнітних потоки Φ_{np} і $\Phi_{зв}$, що обертаються в різні сторони з однаковою частотою (рис. 4.18), об/хв:

$$n_{np} = n_{зв} = f_1 \times 60/p = n_1. \quad (4.13)$$

Вважаємо потік Φ_{np} , що обертається в напрямку обертання ротора, прямим, а потік $\Phi_{зв}$ – зворотнім. Припустимо, що ротор двигуна обертається проти годинникової стрілки, тобто в напрямку потоку Φ_{np} . Частота обертання ротора n_2 менша частоти обертання магнітного потоку n_1 , тому ковзання ротора відносно потоку Φ_{np}

$$s_{np} = (n_1 - n_2)/n_1 = s. \quad (4.14)$$

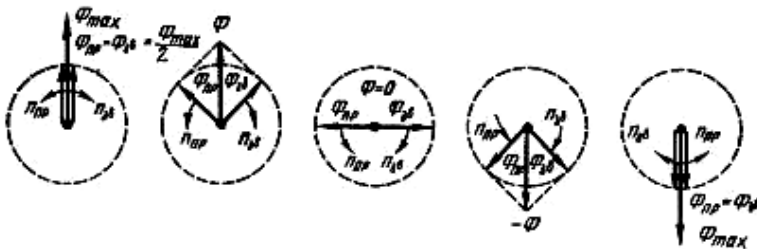


Рисунок 4.18 – Графічний метод розкладання пульсуючого магнітного потоку на два однакових

Магнітний потік $\Phi_{зв}$ обертається зустрічно ротору, тому частота обертання ротора n_2 відносно цього потоку від’ємна.

Прямий Φ_{np} і зворотній $\Phi_{зв}$ магнітні потоки наводять в обмотці ротора ЕРС E_{2np} і $E_{2зв}$, які створюють в короткозамк-

неному роторі відповідно струми I_{2np} і $I_{23\phi}$. Частота струму в роторі пропорційна ковзанню.

$$f_{2np} = f_{1snp}; f_{23\phi} = f_{1s3\phi} = f_1(2 - s_{np}). \quad (4.15)$$

При невеликих значеннях ковзання $s = s_{np}$, тобто при роботі двигуна в межах номінального навантаження, електромагнітний момент створюється в основному за рахунок $M_{3\phi}$. Гальмуюча дія моменту зворот нього поля $M_{3\phi}$ – незначна.

Пояснюється це тим, що $f_{23\phi} > f_{2np}$, тому, індуктивний опір розсіювання обмотки ротора $x_{23\phi} = x_{2s3\phi}$ струмові $I_{23\phi}$ набагато більший його активного опору. Тому струм $I_{23\phi}$, що має велику індуктивну складову, створює сильну розмагнічуючу дію на зворотній магнітний потік $\Phi_{3\phi}$, значно послаблюючи його. Якщо врахувати, що коефіцієнт потужності невеликий, то стане зрозуміло, чому $M_{3\phi}$ в режимі навантаження двигуна не створює значної гальмівної дії на ротор однофазного двигуна.

$$\cos \varphi_{23\phi} = r_2 / \sqrt{r_2^2 + x_{23\phi}^2}, \quad (4.16)$$

На рис. 4.18. зображені графіки залежностей електромагнітних моментів від ковзання для однофазного двигуна. Графік результуючого моменту $M = f(s_{3\phi})$ отриманий відніманням ординат моментів M_{np} і $M_{3\phi}$. При нерухомому роторі ($n_2 = 0$) ковзання $s_{np} = s_{3\phi} = 1$ і $M_{np} = M_{3\phi}$, тому початковий пусковий момент однофазного асинхронного двигуна $M_n = 0$.

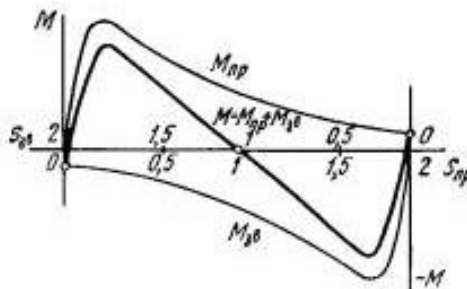


Рисунок 4.18 – Графіки залежностей електромагнітних моментів від ковзання

Для створення пускового моменту необхідно привести ротор в обертання в ту чи іншу сторону. Тоді моментів M_{np} і $M_{зв}$ порушується і результуючий електромагнітний момент набуде деякого значення:

$$M = M_{np} - M_{зв}.$$

4.3.2 Трифазові асинхронні машини

Асинхронна машина має властивість оборотності і може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Однак найбільш практичне застосування одержали асинхронні двигуни. Вигідно відрізняючись від інших електродвигунів простотою конструкції і надійністю в роботі, асинхронні двигуни в наш час є основним типом електродвигуна, що застосовується для привода різних механізмів у промисловості, на будівництві, у сільському господарстві

Нерухома частина асинхронного двигуна – статор має трифазну обмотку, при включенні якої в мережу виникає обертове магнітне поле. Швидкість обертання цього поля:

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p}. \quad (4.17)$$

У розточенні статора розташована обертова частина двигуна – ротор, що складається з вала, осердя й обмотки (рис. 4.19). Обмотка ротора складається зі стрижнів, покладених у пази осердя і замкнутах із двох сторін кільцями. Обертове поле статора перетинає провідники (стрижні) обмотки ротора і наводить у них ЕРС. Але оскільки обмотка ротора замкнута, то в стрижнях виникають струми. Взаємодія цих струмів з полем статора створює в провідниках обмотки ротора електромагнітні сили F_{np} , напрямки яких визначається за правилом «лівої руки». Як видно з рис. 4.19, сили F_{np} прагнуть повернути ротор у напрямку обертання магнітного поля статора. Сукупність сил F_{np} , прикладених до окремих провідників, створює на роторі електромагнітний момент M , що приводить його в обертання зі

швидкістю n_2 . Обертання ротора через вал передається виконавчому механізму.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (4.18)$$

Таким чином, електрична енергія, що надходить в обмотку статора з мережі, перетворюється в механічну. Напрямок обертання магнітного поля статора, а отже, і напрямку обертання ротора, залежить від порядку проходження фаз напруги, що підведена до обмотки статора. При необхідності змінити напрямку обертання ротора асинхронного двигуна варто поміняти місцями будь-яку пару проводів, що з'єднують обмотку статора з мережею.

Наприклад, порядок проходження фаз ABC замінити порядком CBA . Швидкість обертання ротора n_2 асинхронних двигунів завжди менше швидкості обертання поля n_1 , тому що тільки в цьому випадку можливе наведення ЕРС в обмотці ротора. Різниця швидкостей ротора й обертового поля статора характеризується величиною, яка називається *ковзанням*. Часто ковзання виражається у відсотках:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100. \quad (4.19)$$

Ковзання асинхронного двигуна може змінюватися в межах від 0 до 1. При цьому $s \approx 0$ відповідає режиму холостого ходу, коли ротор двигуна не випробує протидіючих моментів, а $s = 1$ відповідає режиму короткого замикання, коли протидіючий момент двигуна перевищує обертаючий момент і тому ротор двигуна нерухомий ($n_2 = 0$).

Ковзання, що відповідає номінальному навантаженню двигуна, називається *номінальним ковзанням*. Так, наприклад, для двигунів нормального виконання потужністю від 1 до 1000 кВт номінальне ковзання приблизно складає відповідно 0,06 - 0,01, тобто 6-1%. Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна згідно з виразом (4.19) дорівнює:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (4.20)$$

На щитку двигуна вказується номінальна швидкість обертання n_2 . Ця величина дає можливість визначити синхронну швидкість обертання n_1 , номінальне ковзання s , а також число полюсів обмотки статора $2p$. Ротори асинхронного двигуна бувають двох видів: Короткозамкнутий ротор – це сердечник, набраний з листової сталі, короткозамкнутий і фазний ротор.

У пази сердечника заливається розплавлений алюміній, внаслідок чого утворюються стержні, які замикаються закоротко торцевими кільцями. Ця конструкція називається «кліткою білки». У асинхронних двигунах великої потужності замість алюмінію може застосовуватися мідь.

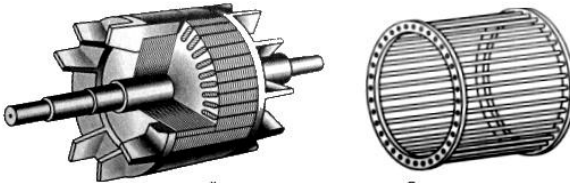


Рисунок 4.21 – Короткозамкнутий ротор і «біляча клітка»

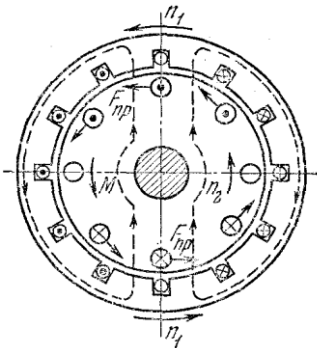


Рисунок 4.20 – Принцип дії асинхронного двигуна

Фазний ротор має трифазну обмотку, яка практично не відрізняється від обмотки статора. У більшості випадків кінці обмоток фазного ротора з'єднуються в зірку, а вільні кінці підводяться до контактних кілець. За допомогою щіток, які підключені до кілець, в ланцюг обмотки ротора можна вводити додатковий резистор. Це треба для того, щоб можна було змінювати активний опір в ланцюзі ротора,

тому що це сприяє зменшенню великих пускових струмів. На рис. 4.23. зображені схеми електричні принципи включення трьохфазних асинхронних двигунів.

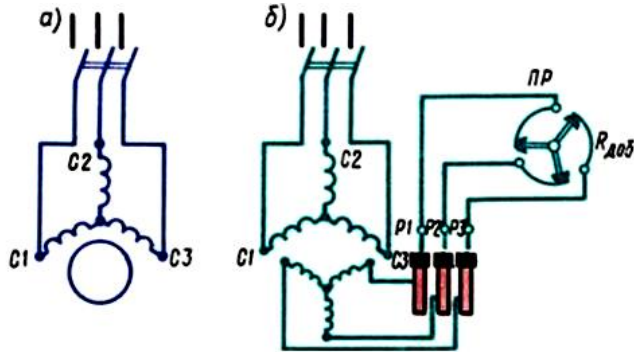


Рисунок 4.22 – Схеми електричні принципи включення трьохфазних асинхронних двигунів:

а) короткозамкнутий ротор; в) фазний ротор.

4.3.2.1 Втрати і коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна

Перетворення енергії в асинхронному двигуні, як і в інших електричних машинах, зв'язано з втратами енергії. Ці втрати поділяються на механічні, магнітні й електричні.

З мережі в обмотку статора надходить потужність P_1 . Частина цієї потужності витрачається на покриття *магнітних втрат* у сердечнику статора p_{c1} , а також в обмотці статора на покриття *електричних втрат*, обумовлених нагріванням обмотки:

$$p_{e1} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (4.21)$$

Частина потужності, що залишилася, за допомогою магнітного потоку передається на ротор і тому *називається електромагнітною потужністю*:

$$P_{em} = P_1 - (p_{c1} + p_{e1}). \quad (4.22)$$

Частина електромагнітної потужності затрачається на покриття *електричних втрат в обмотці ротора*:

$$p_{e2} = m_2 I_2'^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (4.23)$$

Інша частина електромагнітної потужності перетвориться в механічну потужність двигуна, називану *повною механічною потужністю*:

$$P_2' = P_{em} - p_{e2}. \quad (4.24)$$

Скориставшись формулою (4.23), можна записати наступний вираз повної механічної потужності:

$$P_2' = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = p_{e2} \frac{1-s}{s}. \quad (4.25)$$

Підставимо отриманий вираз у формулу (4.24):

$$p_{e2} \frac{1-s}{s} = P_{em} - p_{e2}. \quad (4.26)$$

Перетворивши це рівняння, одержимо:

$$p_{e2} = s P_{em}, \quad (4.27)$$

тобто *потужність електричних втрат у роторі пропорційна ковзанню*. Тому робота асинхронного двигуна більш економічна при малих ковзаннях.

Слід зазначити, що в роторі двигуна виникають також і магнітні втрати, але через невелику частоту струму ротора ($f_2 = f_1 s$) ці втрати настільки малі, що ними звичайно зневажають.

Механічна потужність на валу двигуна P_2 менше повної механічної потужності P_2' на величину механічних p_{mex} і додаткових p_δ втрат:

$$P_2 = P'_2 - (p_{\text{мех}} + p_{\text{д}}). \quad (4.28)$$

Механічні втрати в асинхронному двигуні обумовлені тертям у підшипниках і тертям обертових частин об повітря. Додаткові втрати викликані наявністю в двигуні полів розсіювання і пульсацією поля в зубцях ротора і статора.

Таким чином, корисна потужність асинхронного двигуна:

$$P_2 = P_1 - \sum p,$$

де $\sum p$ — сума втрат в асинхронному двигуні,

$$\sum p = p_{\text{с1}} + p_{\text{е1}} + p_{\text{е2}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}}. \quad (4.29)$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}. \quad (4.30)$$

Завдяки відсутності колектора ККД асинхронних двигунів вище, ніж у двигунів постійного струму. Залежно від величини потужності асинхронних двигунів їх ККД при номінальному навантаженні може бути в межах від 83 до 95% (верхня межа відповідає двигунам великої потужності).

4.3.2.2 Електромагнітний момент асинхронного двигуна

Електромагнітний момент асинхронного двигуна створюється взаємодією струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем. Електромагнітний момент M пропорційний електромагнітній потужності

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega_1}, \quad (4.31)$$

де $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$ — кутова швидкість обертання магнітного

поля статора.

Оскільки синхронна швидкість

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p}, \text{ то}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1 60}{60p} = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Підставивши у вираз (5.35) значення електромагнітної потужності по формулі (4.31), одержимо:

$$M = \frac{p_{e2}}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 s}, \quad (4.32)$$

тобто електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний потужності електричних втрат в обмотці ротора

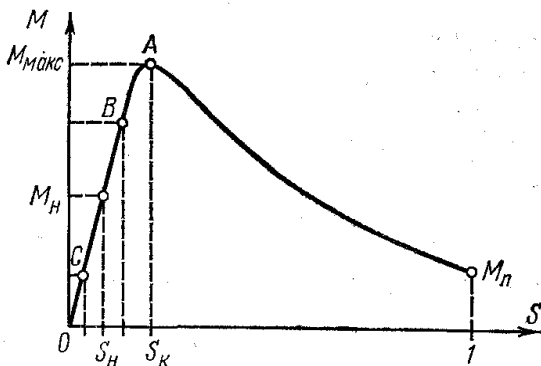


Рисунок 4.23 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Підставляючи у формулу (4.32) значення струму I_2' , а також значення $\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$, одержимо:

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} [H \cdot m]. \quad (4.33)$$

Вираз моменту (4.33) дає можливість побудувати графік залежності електромагнітного моменту двигуна від ковзання $M = f(s)$, названого *механічною характеристикою* двигуна (рис. 4.23).

При побудові механічної характеристики двигуна виходять з положення, що усі величини, що входять у формулу (4.33), за винятком ковзання s , є постійними, тому що величини m_1 , r_1 , r_2' , x_1 і x_2' задаються конструкцією двигуна, а f_1 і U_1 є незмінними параметрами мережі, що живить двигун.

4.3.2.3 Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна визначається формулою:

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s). \quad (4.34)$$

З цього виразу випливає, що швидкість асинхронного двигуна можна відрегулювати зміною якої-небудь із трьох величин: ковзання, частоти струму статора чи числа пар полюсів.

Зміна підведеної до двигуна напруги здійснюється або за допомогою регулювального автотрансформатора або за допомогою реакторів, що включаються в розрив ланцюга статора. Через вузький діапазон регулювання і неекономічності (необхідність додаткових пристроїв) розглянутий спосіб регулювання швидкості не одержав широкого поширення.

Так, наприклад, якщо напруга U_1 понизиться в порівнянні з номінальним U_{1n} на 30%, тобто дорівнюватиме $U_1 = 0,7 U_{1n}$, то

максимальний момент двигуна зменшиться до значення $M'_{\max}=0,7^2 M_{\max}=0,49 M_{\max}$ тобто зменшиться більш ніж удвічі.

4.3.2.4 Типи асинхронних двигунів

Асинхронні двигуни з короткозамкненим і фазним роторами розроблялися й випускалися у вигляді єдиних серій: А-АО (1949-1951); А2-АО2 потужністю 0,6...100 кВт (1958-1960); А-АК потужністю 100...1000 кВт (1952...1956); А2-АК2 потужністю 100...1000 кВт (1964-1965); А3-АО3 потужністю 132...500 кВт; 4А і АИ (АИР) потужністю 0,06...400 кВт (дотепер); В останні роки освоєний випуск нових серій асинхронних двигунів серій РА (0,37...100 кВт), 5А (5АН) (0,37...400 кВт) і 6А. Розробка 4А, АИ, РА, 5А і 6А базувалася, крім вітчизняних стандартів, на рекомендаціях МЕК (Міжнародної електротехнічної комісії).

Крім основного виконання двигуни мають ряд модифікацій:

АП і АОП – короткозамкнені з підвищеним початковим пусковим моментом;

АС і АОС – короткозамкнені з підвищеним ковзанням; двигуни короткозамкнені багатошвидкісні;

АОТ – короткозамкнені з підвищеним значенням ККД і $\cos \varphi$;

АН – короткозамкнені;

АК і АКН – з контактними кільцями на роторі.

У промисловості широко застосовуються спеціалізовані серії асинхронних двигунів.

Серія МТ – кранові двигуни, виконуються з контактними кільцями для плавного регулювання швидкості обертання потужністю від 2 до 160 кВт при $T_B=25\%$.

Серія ВАО – вибухонепроникні двигуни потужністю до 100 кВт.

4.4 Синхронні машини

Синхронною називається безколекторна машина змінного струму, у якій швидкість обертання ротора n_1 знаходиться в

строго постійному відношенні до частоти f_1 мережі змінного струму:

$$n = \frac{f_1 60}{p}, \quad (4.35)$$

де p – число пар полюсів машини.

Синхронна машина оборотна і може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Синхронні машини поділяються на двигуни та генератори.

Синхронний генератор є основним типом генератора змінного струму, що застосовується у процесі виробництва електроенергії.

Синхронні двигуни на відміну від двигунів інших типів мають строго постійну швидкість обертання при даній частоті (4.35), що не залежить від навантаження. Іншою відмінною рисою синхронних двигунів є можливість регулювання їхнього коефіцієнта потужності. Остання властивість найбільш важлива в електроприводі великої потужності, тому що дає можливість підвищити коефіцієнт корисної дії. Синхронні двигуни малої потужності застосовуються в системах автоматики, де використовується головним чином їхня властивість постійної швидкості обертання. Синхронні машини мають ще одне дуже важливе застосування – як синхронний компенсатор, що дає можливість поліпшувати коефіцієнт потужності в електричній системі. Синхронні машини виготовляються різної потужності: від десятків ват (двигуни автоматичних систем) до сотень мегаватів (турбо- і гідрогенератори, синхронні компенсатори).

4.4.1 Принцип дії синхронних машин

Робота синхронного генератора заснована на явищі електро-магнітної індукції і полягає в перетворенні механічної енергії в електричну енергію змінного струму.

При вивченні принципу дії генераторів постійного струму відзначалося, що в обмотці якоря цього генератора індукується

змінна ЕРС, що за допомогою колектора і щіток перетворюється в постійну ЕРС. Отже, якщо генератор постійного струму позбавити колектора, то він перетвориться в генератор змінного струму.

На рис. 4.24 зображена найпростіша модель однофазного генератора змінного струму, влаштована за принципом моделі генератора постійного струму, але, на відміну від останнього, не має колектора.

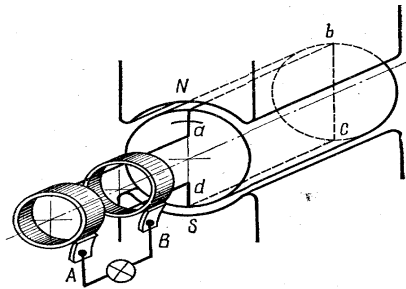


Рисунок 4.24 – Найпростіша модель синхронної машини

Обертова частина генератора називається ротором, нерухома – статором. Щітки *A* і *B* накладені на контактні кільця, з'єднані з кінцями обмотки. Якщо припустити, що магнітна індукція *B* розподіляється в повітряному зазорі синусоїдально ($B = B_m \sin \alpha$), то ЕРС, що індукується в якірній обмотці генератора, також є синусоїдальною.

Обмотка статора трифазного синхронного генератора складається з трьох однофазних обмоток, зміщених у просторі під кутом 120 ел. градусів відносно один одного (рис. 4.25) і з'єднаних зіркою чи трикутником.

$$e = Blv = B_{\text{макс}} l v \sin \alpha. \quad (4.36)$$

На роторі розташована обмотка збудження, при підключенні якої до джерела постійного струму (збудника) виникає магнітне поле збудження.

За допомогою первинного двигуна ротор генератора приводять в обертання зі швидкістю n_1 . При цьому магнітне поле ротора також обертається та індукуює в трифазній обмотці статора ЕРС E_A, E_B, E_C , що, будучи однаковими по величині і зрушеними по фазі відносно один одного на $1/3$ періоду (120 ел. градусів), утворюють трифазну симетричну систему ЕРС. Більшість синхронних генераторів проектується на промислову частоту 50 Гц. Для одержання ЕРС такої частоти необхідна швидкість обертання ротора: У синхронних машинах застосовуються два способи збудження: електромагнітне і збудження постійними магнітами.

При електромагнітному збудженні основний магнітний потік створюється за допомогою обмотки збудження.

$$n = \frac{50 \cdot 60}{p} = \frac{3000}{p}. \quad (4.37)$$

Залежно від способу живлення обмотки збудження постійним струмом синхронні машини розділяються на машини незалежного збудження і машини із самозбудженням. При незалежному збудженні для живлення обмотки збудження використовується генератор постійного струму, названий збудником (див. рис. 4.25, а). Реостати r_1 і r_2 призначені для регулювання величини струму збудження синхронної машини.

Потужність збудника складає від 2 до 5% потужності синхронної машини при напрузі до 450 В.

Збудника звичайно монтують разом із синхронною машиною і він є її невід'ємною частиною. При цьому збудника розташовують або по осі машини, тоді якір збудника закріплюють на виступаючому кінці вала, або його встановлюють на корпусі машини і тоді обертання якоря збудника здійснюють від вала синхронної машини за допомогою пасової передачі.

При самозбудженні живлення обмотки збудження здійснюється від синхронного генератора з застосуванням випрямляча (рис. 4.25, б). Самозбудження застосовується в синхронних машинах малої і середньої потужності.

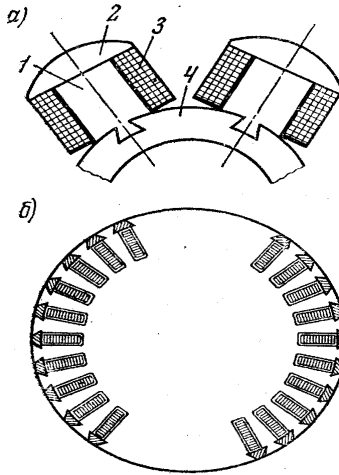


Рисунок 4.26– Конструкція роторів синхронних машин:

- а – ротор з явно вираженими полюсами;
- б – ротор з неявно вираженими полюсами;
- 1 – осереддя полюса; 2 – полюсний наконечник;
- 3 – полюсна котушка; 4 – обід ротора

4.4.2 Типи синхронних машин

В силових установках змінного струму як первинні двигуни синхронних генераторів застосовують парові чи гідравлічні турбіни і двигуни внутрішнього згоряння (дизелі). В першому випадку синхронні генератори називають гідрогенераторами і турбогенераторами, а в другому випадку – дизель-генераторами. Усі ці типи синхронних генераторів конструктивно відрізняються один від одного.

Оскільки гідравлічна турбіна працює при порівняно невеликій швидкості обертання (60-500 об/хв), то для одержання змінного струму промислової частоти в гідрогенераторі застосовують ротор з великим числом полюсів. Тому ротори гідрогенераторів мають конструкцію з *явно вираженими полюсами*, при якій кожен полюс виконується у виді окремого вузла, що складається із осереддя і полюсної котушки. Усі полюси закріплюються на ободі (рис. 4.26, а).

Гідрогенератори, як правило, виконуються з вертикальним розташуванням вала (рис. 4.27). Парова турбіна працює при великій швидкості обертання, тому турбогенератори є швидкохідними синхронними машинами і їхні ротори, як правило, виконуються двополюсними ($n_1 = 3000$ об/хв).



Рисунок 4.27 – Гідрогенератор

Турбогенератори і дизель-генератори виконуються з горизонтальним розташуванням вала. Дизель-генератори розраховуються на швидкість обертання 600-1500 об/хв і виконуються з явнополюсним ротором.

4.5 Електричні машини спецпризначення

До електричних машин спецпризначення відносяться: крокові двигуни, мотор генератори, сельсини, обертовий трансформатор тощо.

4.5.1 Крокові двигуни

Кроковий двигун – електричний двигун, в якому імпульсне живлення електричним струмом призводить до того, що його ротор не обертається неперервно, а виконує щоразу обертальний рух на заданий кут. Завдяки цьому, кут повороту ротора залежить від числа поданих імпульсів струму, а кутова

швидкість ротора точно рівна частоті імпульсів помноженій на кут повороту ротора за один цикл роботи двигуна. Кут повороту двигуна під впливом одного імпульсу може мати різні значення, залежні від конструкції двигуна, – як правило це значення в діапазоні від декількох градусів до декілька десятків градусів.

Конструктивно крокові електродвигуни складаються із статора, на якому розташовані обмотки збудження, і ротора, виконаного з магнітом'якого (ферромагнітного) матеріалу або з магнітотвердого (магнітного) матеріалу. Крокові двигуни з магнітним ротором дозволяють отримувати більший крутний момент і забезпечують фіксацію ротора при знеструмлених обмотках.

Переваги:

- Двигун працює з повним моментом у стані спокою (якщо обмотки підключені до живлення).

- Прецезійне позиціонування і повторюваність кроку – хороші крокові двигуни мають точність близько 3-5% кроку і ці помилки не накопичується від кроку до кроку.

- Можливість швидкого розгону, гальмування і зміни напрямку руху.

- Безвідмовність – у зв'язку з відсутністю щіток. Довговічність двигуна залежить тільки від довговічності підшипників.

- Залежність оборотів двигуна від дискретних імпульсів дозволяє керувати двигуном без зворотного зв'язку, завдяки чому кроковий двигун простіший і дешевший в керуванні.

- Можливість досягнення дуже низьких швидкостей обертання з навантаженням закріпленим безпосередньо на осі двигуна.

- Широкий діапазон швидкостей обертання отримуваний завдяки тому, що швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів.

Недоліки:

- Складнощі при роботі з дуже високими швидкостями.

- Відносно складна схема управління.

Серед існуючих типів крокових двигунів в цифровій системі управління СП використаємо уніполярний КД.

Управління роботою КД здійснюється подачею напруг на обмотки «А», «В» або «А», «В», «С», причому розрізняють повнокрокові, двофазні і полу-крокові режими розподілу сигналів на тимчасовій осі.

Формуються вони на виходах МК у вигляді сітки зрушених по фазі імпульсів (рис. 4.28). Дуже зручно використовувати багатоканальний ШІМ, якщо, звичайно, він є в конкретному МК. Основний режим роботи крокової двигуна – динамічний. Крокові двигуни на відміну від синхронних розраховані на входження в синхронізм із стану спокою та примусове електричне гальмування.

Завдяки цьому в кроковому електроприводі забезпечується пуск, гальмування, реверс і перехід з однієї частоти керуючих імпульсів на іншу.

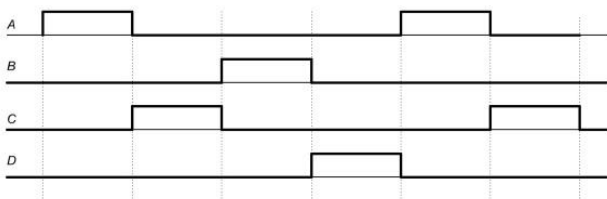


Рисунок 4.28 – Імпульси керування КД

Для більш детального засвоєння роботи КД розглянемо принцип роботи крокового двигуна з активним ротором на двофазному двигуні з однією парою полюсів на основі постійного магніту, рис. .

Живлення обмоток статора здійснюється від комутатора, як правило імпульсами напруги за сигналом завдання частотно-імпульсного вигляду. В початковий момент напруга подається на першу фазу, яка створює вертикальне магнітне поле статора з полюсами N-S.

При взаємодії полів статора та ротора, останній займає стійке положення, вказане на рис. 4.29, а. Після увімкнення другої та відключення першої фази створюється магнітне поле статора з горизонтальними полюсами, тобто магнітне поле

здійснює поворот за годинниковою стрілкою на 90° , рис. 3.3,б, що обумовлює виникнення кута непогодження між осями магнітних полів статора та ротора рівного 90° . На ротор починає діяти момент, який повертає ротор слідом за полем статора.

Якщо відключити другу фазу та знову увімкнути першу, але з протилежною до початкової полярністю напруги, то ротор знову повернеться на кут 90° , рис. 4.29,в. Реверс двигуна легко здійснюється зміною полярності імпульсу поточного кроку. Розглянуте увімкнення фаз статора по черзі називається симетричною комутацією.

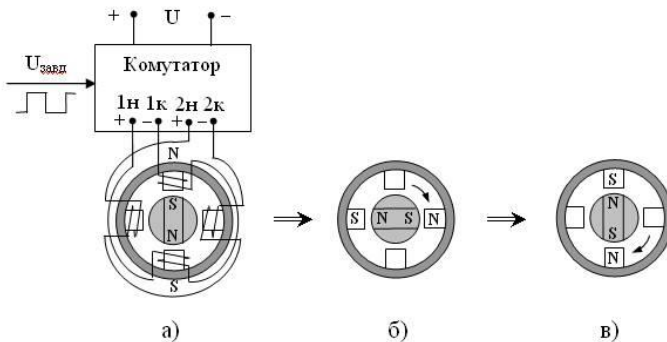


Рисунок 4.29 – Принцип роботи крокового двигуна

$$M = M_{\text{мак}} \cdot \sin \alpha, \quad (3.1)$$

де α – кут неузгодження.

Існує також несиметрична комутація, яка дозволяє зменшити крок повороту ротора вдвоє. Для цього друга фаза для вихідного положення схеми на рис. 3.5,а вмикається при увімкненій першій фазі, що формує вісь магнітного поля статора, повернену на кут 45° і обумовлює відповідний поворот ротора. Потім перша фаза відключається і ротор повертається ще на 45° . Далі знову вмикається перша фаза, але з протилежною полярністю напруги і т.д. Кутове повороту активного ротора дорівнює:

$$\alpha = \frac{360}{p \cdot n}, \quad (3.2)$$

де p – число пар полюсів ротора; n – число перемикачів за цикл.

Число перемикачів при симетричній комутації дорівнює кількості фаз обмотки статора $n = m$, а при несиметричній – удвоє більше, тобто $n = 2m$.

Кроковий двигун має абсолютно жорсткі механічні характеристики як синхронний двигун. Із збільшенням частоти комутації та відповідно швидкості двигуна струм у фазах не встигає досягнути усталеного значення, тому максимальний середній момент зменшується.

Кроковий двигун дуже легко стикується з ЕОМ за допомогою блоку перетворення двійкового коду у відповідну частоту, тому він широко застосовується для приводів подачі верстатів із числовим програмним керуванням, позиціонування робочих органів роботів та маніпуляторів тощо.

Перевагою також є висока надійність та забезпечення заданої швидкості та положення без використання замкненої системи керування.



Рисунок 4.30 – Загальний вигляд крокового двигуна

4.5.2 Мотор генератори

Мотор-генератор або Електромашинний перетворювач (нім. Umformer, умформер, мотор-генератор, двигун-генератор) – електрична машина для перетворення електричної енергії з однієї її форми в іншу.

Електромашинний перетворювач може здійснювати:

- перетворення постійного електричного струму на змінний, як правило, більш високої напруги;
- отримання постійного струму із змінного для спеціальних випадків (живлення електрозварювального обладнання, деякі моделі старих електровозів);
- передавання потужності між електричними мережами різної частоти (50 і 60 Гц, залізниці з живленням змінним струмом низької частоти);
- перетворення однофазного струму на трифазний.

Найчастіше являє собою електродвигун, з'єднаний валом (ремінною передачею, системою зубчастих шестерень) з електричним генератором.

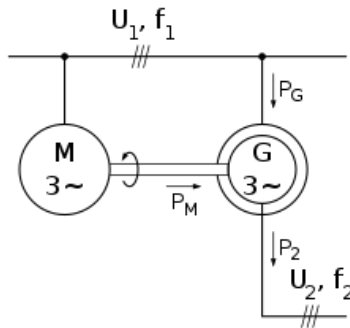


Рисунок 4.31 – Схема електромашинного перетворювача

У конструкцію також вводяться додаткові пристрої для стабілізації вихідної напруги і частоти.

Відомі також умформери з єдиним якорем (однойкірні перетворювачі), у яких обмотки різного роду струму роз'єднані. Обмотки постійного струму виводяться на колектор, а змінного струму – на контактні кільця.

Є також машини з загальними обмотками для різного роду струму. У разі перетворення числа фаз навіть немає потреби в колекторі або ковзних контактах. У цьому випадку вся обмотка навивається на статорі і в потрібному місці робляться відпайки.

Таким чином, наприклад, асинхронна машина може перетворювати одно – чи двофазний струм на будь-який багатофазний (наприклад 3-фазний).

Приклад такої машини – фазорозщеплювач електро-возів ВЛ60, ВЛ80, ВЛ85, а також ЭП1М, 2ЭС5К і 3ЭС5К нових випусків.

4.5.3 Сельсини

Сельсин – інформаційна електрична машина змін-ного струму, призначена для вироблення напруг, амплітуди і фази яких визначаються кутовим положенням ротора, і яка використовується як давач або приймач у системах дистанційної синхронної передачі кутових переміщень.

Сельсини (англ. *self-synchronizing*) мають здатність до самосинхронізації. Сельсин передачі працює як звичайна механічна передача, але крутний момент між валами передається не зубцями трибів, а магнітним потоком безпосередньо.

В системах автоматики і керування часто виникає необхідність синхронного і синфазного обертання або повороту двох і більше осей, механічно не з'єднаних (наприклад, на РЛС – радіолокаційних системах з обертальною антеною). Такі задачі вирішуються за допомогою систем синхронного зв'язку.

Найпростіший сельсин складається зі статора з трьохфазною обмоткою (схема включення – трикутник або зірка) і ротора з однофазною обмоткою. Два таких пристрої електрично з'єднуються відповідними виводами – статор зі статором і ротор з ротором (рис. 4.32).

На роторі подається однакова змінна напруга. За таких умов обертання ротора одного сельсину викликає поворот ротора другого сельсину.

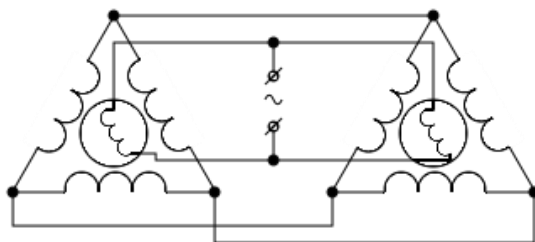


Рисунок 4.32 – Система з двох простих сельсинів

При повороті одного з сельсинів (сельсин-давача) на якийсь кут в ньому наводиться ЕРС, відмінна від початкової. Така ж ЕРС буде виникати і в другому сельсині (сельсині-приймачі) і по правилу лівої руки він відхилиться на той же кут.



Рисунок 4.33 – Сильвін давач та приймач

4.5.4 Обертовий трансформатор

Обертові (поворотні) трансформатори (ОТ) призначені для одержання змінної напруги, що залежить від кута повороту ротора по призначенню ОТ ставляться до інформаційних електричних машин і застосовуються в системах автоматичного регулювання в якості вимірювальних елементів (датчиків кута) для виміру розбіжностей між двома обертовими осями. У обчислювальних пристроях обертовий трансформатори використовують при вирішенні різноманітних математичних задач, пов'язаних із побудовою трикутників, перетворенням координат, складанням і розкладанням векторів тощо. В залежності від графіка функціональної залежності ЕРС

вторинної обмотки від кута повороту ротора обертові трансформатори розділяють на наступні типи:

- синусно-косинусний обертовий трансформатор;
- лінійний обертовий трансформатор;
- обертовий трансформатор призначений для вирішення геометричних задач.

Крім того, обертальні трансформатори можуть застосовуватися в якості *масштабних трансформаторів* (МОТ) для узгодження напруг окремих каскадів автоматичного пристрою, електричних машин синхронного зв'язку в трансформаторних системах дистанційної передачі кута.

Обертовий трансформатор (рис. 4.34). конструктивно являє собою електричну машину індукційного типу малої потужності.

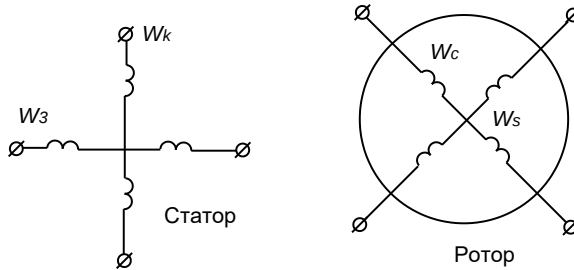


Рисунок 4.34 – Принципова схема обертового

Трансформатор може працювати в режимі повороту ротора на певний кут α і в режимі безперервного обертання, коли обмотки для зменшення числа ковзних контактів міняють місцями: на роторі розміщують обмотки збудження та компенсаційну, на статорі – синусну і косинусну. На рис. 4.35 зображено загальний вигляд обертового трансформатора.



Рисунок 4.35 – Загальний вигляд обертового трансформатора

4.5.5 Тахометри

Тахометр (від грец. *тахос* — «швидкість» та *мётрон* — «міра») – прилад, яким вимірюють кутову швидкість обертового тіла (частоту обертання деталей машин та механізмів).

На рис.4.36 зображено звичайний електронний тахометр.



Рисунок 4.36 – Звичайний електронний тахометр

Вимірювання може бути контактним або безконтактним залежно від типу датчика швидкості обертання (енкодер). Тахометр з автоматичним записом показань називають тахографом.

Підрахунок здійснюється шляхом реєстрації кількості імпульсів, що надійшли від датчика, тривалості паузи між імпульсами, а також порядку надходження імпульсів від датчиків. Крім того, тахометр може бути використаний як лічильник імпульсів, наприклад, під час підрахунку продукції на конвеєрі, витрат сировини, матеріалів, часу напрацювання устаткування, машин і механізмів при випробуваннях та обкатці.

Підрахунок вимірювання здійснюється в прямому, зворотному або в обох напрямках. Вимірювана величина може бути заздалегідь програмно масштабована в конкретних одиницях вимірювання (години, хвилини, метри, штуки, пакунки тощо). На рис. 4.37 зображено Лазерний безконтактний цифровий тахометр DT-2234C+



Рисунок 4.37 –Лазерний безконтактний цифровий тахометр DT-2234C+

Тахометр, для вимірювання швидкості обертання
DT-2234C+

Технічні характеристики:

Діапазон: від 2,5 до 99999 RPM

Дистанція: від 50 до 500мм

Зберігає результати вимірювань

Розмір: 130x70x29 мм

Вага: 160г

Живлення: крона 9В



? Контрольні питання

1. Що уявляють собою електричні машини?
2. Як поділяються за призначенням електричні машини?
3. Як здійснюється класифікація електричних машин за потужністю та частотою обертання?
4. Машина постійного струму – це...
5. Як здійснюється класифікація двигунів постійного струму за способом збудження?
6. Яким співвідношенням пов'язані потужність на валу P_2 , момент M та частота обертання n ?
7. Як визначається коефіцієнт корисної дії ДПС?
8. Генератор постійного струму це...
9. Як здійснюється класифікація генераторів постійного струму за способом збудження?
10. Електричні машини змінного струму – це...
11. Як поділяються за призначенням електричні машини змінного струму?
12. Як пов'язані частота обертання ротора з частотою обертання магнітного потоку?
13. Електромагнітний момент асинхронного двигуна створюється...
14. Яким чином здійснюється регулювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна?
15. Синхронною називається машина...
16. На якому явищі заснована робота асинхронного двигуна?
17. Які існують типи синхронних машин?
18. Кроковий двигун це...
19. Як здійснюється керування кроковим двигуном?
20. Де використовують сельсини та обертові трансформатори?
21. Область застосування тахометрів...

Частина 2

ЕЛЕКТРОНІКА

Електроніка – це галузь фізики та техніки, в якій досліджуються електронні процеси, що пов’язані з утворенням та керуванням руху вільних електронів та/або інших заряджених частинок в різноманітних середовищах (вакуум, тверде тіло, газ, плазма) та на їх границях, а також проблеми і методи розробки електронних приладів різного призначення.

Електроніка спирається на багато розділів фізики – електродинаміку, класичну і квантову механіку, фізику твердого тіла, оптику, термодинаміку, а також на хімію, металургію, кристалографію і інші науки.

Розділ I

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА НА ОСНОВІ

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ МАТЕРІАЛІВ

Загальні відомості про напівпровідники

Напівпровідникові діоди

Транзистори

Тиристори

Оптрони

1.1 Загальні відомості про напівпровідники

Напівпровідники (англ. semiconductors) – такі матеріали, електропровідність яких має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Відрізняються від провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури та різних видів випромінювання. Основною властивістю цих матеріалів є збільшення електричної провідності з ростом температури.

Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких становить близько кількох електрон-вольт (eV).

До числа напівпровідників належать багато простих речовин (германій, кремній, селен, телур, арсен та ін), вели-

чезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію, телурид цинку, фосфід галію та інші). Напівпровідникові властивості мають багато потрійних і складніших хімічних сполук, наприклад ZnSiAs^2 . Напівпровідниковими є ціла низка органічних сполук: антрацен, нафтален, фталоціаніни тощо.

Типовими напівпровідниками є вуглець (C), германій (Ge) і кремній (Si).

Германій – тендітний сірувато-білий елемент, відкритий в 1886 г. Кремній був відкритий в 1823 г. Він широко розповсюджений у земній корі у вигляді кремнезему (двоокису кремнію), силікатів і алюмосилікатів. Двоокисом кремнію багаті пісок, кварц, агат і кремій. Із двоокису кремнію SiO_2 хімічним шляхом одержують чистий кремній.

Кремній є найбільше широко використовуваним напівпровідниковим матеріалом. Розглянемо докладніше утворення електронів провідності в напівпровідниках на прикладі кремнію. Атом кремнію має порядковий номер $Z = 14$ у періодичній системі Менделєєва. Тому до складу його атома входять 14 електронів. Однак тільки чотири з них перебувають на незаповненій зовнішній оболонці і є слабо зв'язаними. Ці електрони називаються валентними й обумовлюють чотири валентності кремнію.

Атоми кремнію здатні поєднувати свої валентні електрони з іншими атомами кремнію за допомогою так званого ковалентного зв'язку (рис. 1.1). При ковалентному зв'язку валентні електрони спільно використовуються різними атомами, що приводить до утворення кристала (рис. 1.2). При відсутності домішок і температури, близької до абсолютного нуля, усі валентні електрони атомів у кристалі кремнію взаємно зв'язані й вільних електронів немає, так що кремній не має провідності.

При підвищенні температури або при опроміненні збільшується енергія електронів, що приводить до часткового порушення ковалентних зв'язків і появи вільних електронів. Уже при кімнатній температурі під дією зовнішнього електричного поля вільні електрони переміщаються й у кристалі виникає електричний струм.



Рисунок 1.1 –
Парноелектронний
(ковалентний) зв'язок
атомів кремнію

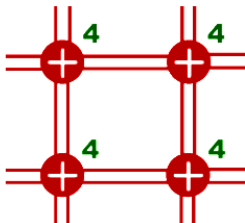


Рисунок 1.2 –Зв'язки в
кристалічних решітках
кремнію

Електропровідність, обумовлена переміщенням вільних електронів, називається *електронною провідністю напівпровідника*, або *n – провідністю (negative)*.

З появою вільних електронів у ковалентних зв'язках утворюється вільне не заповнене електроном (вакантне) місце - «*електронна дірка*». Через те, що дірка виникла в місці відриву електрона від атома, то в області її утвору виникає надлишковий позитивний заряд. При наявності дірки який-небудь із електронів сусідніх зв'язків може зайняти місце дірки й нормальний ковалентний зв'язок у цьому місці відновиться, але буде порушена в тому місці, звідки пішов електрон. Нову дірку може зайняти ще який-небудь електрон і т.д. (рис. 1.3).

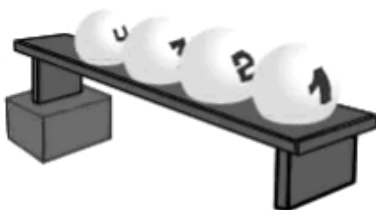


Рисунок 1.3 – Переміщення
дірок

Під дією зовнішнього електричного поля дірки переміщуються в напрямку сил поля, тобто протилежно переміщенню електронів.

Провідність, що виникає в результаті переміщення дірок, називається дірковою провідністю, або *p*- провідністю (positive).

У кристалі чистого напівпровідника при порушенні ковалентних зв'язків виникає однакове число вільних електронів і дірок. Одночасно із цим відбувається зворотний процес - *рекомбінація*, при якій вільні електрони заповнюють дірки, утворюючи нормальні ковалентні зв'язки.

При певній температурі число вільних електронів і дірок в одиниці об'єму напівпровідника в середньому залишається постійним. При підвищенні температури число вільних електронів і дірок сильно зростає й провідність напівпровідника значно збільшується (особливо германія). У цьому істотну відмінність напівпровідників від металів, у яких з підвищенням температури провідність зменшується.

*Електропровідність напівпровідника при відсутності в ньому домішок називається його **власною електропровідністю**.*

Властивості напівпровідника в сильному ступені міняються при наявності в ньому незначної кількості домішок. Уводячи в кристал напівпровідника атоми інших елементів, можна одержати в кристалі перевагу вільних електронів над дірками або, навпаки, перевагу дірок над вільними електронами.

Додавання домішок у напівпровідникові матеріали називається *легуванням*. При заміщенні в кристалічних ґратах атома германія атомом п'ятивалентної речовини (миш'яку, сурми, фосфору) чотири електрони цієї речовини утворюють заповнені зв'язки із сусідніми атомами германія, а п'ятий електрон виявиться вільним (рис. 1.4, а), тому така домішка збільшує електронну провідність (*n-провідність*) і називається *донорною*.

При заміщенні атома германія атомом *тривалентної* речовини (індій, галій, алюміній) його електрони вступають у ковалентний зв'язок із *трьома* сусідніми атомами германія, а зв'язки із *четвертим* атомом германія будуть відсутні, тому що в індію немає четвертого електрона (рис. 1.4, б). Відновлення всіх ковалентних зв'язків можливо, якщо відсутній четвертий електрон буде отриманий від найближчого атома кремнію.

Але в цьому випадку на місці електрона, що покинув атом кремнію, з'явиться дірка, яка може бути заповнена електроном

із сусіднього атома кремнію. Послідовне заповнення вільного зв'язку еквівалентно руху дірок.

Домішки з меншим числом валентних електронів в атомі в порівнянні з атомом даного напівпровідника викликають перевагу діркової провідності й називаються *акцепторними*.

Носії заряду, що визначають вид провідності в напівпровіднику з домішками називаються *основними* (дірки в р-напівпровіднику й електрони в n-напівпровіднику), а носії заряду протилежного знака – *неосновними*.

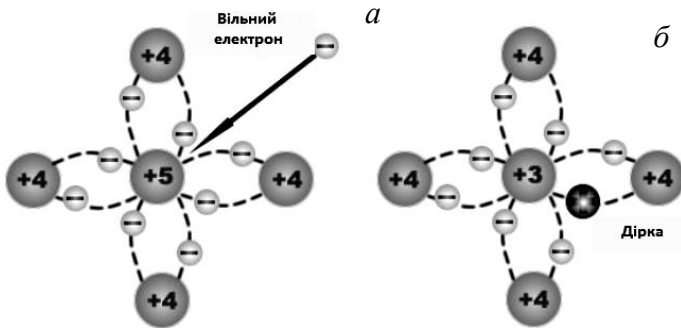


Рисунок 1.4 –Домішкова провідність

1.2 Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковий діод (*англ. semiconductor (crystal) diode; нім. н. Halbleiterdiode f*) – напівпровідниковий прилад з одним випрямним електричним переходом і двома зовнішніми виводами. Випрямним електричним переходом, в напівпровідникових діодах, може бути електронно-дірковий перехід, гіперперехід або контакт метал-напівпровідник.

Випрямний перехід, окрім ефекту випрямлення, має й інші властивості, що використовуються для створення різних видів напівпровідникових діодів:

- випрямних;
- стабілітронів;
- тунельних;

- варикапів тощо.

Тому напівпровідникові діоди поділяють: на випрямні, високочастотні та надвисокочастотні, імпульсні, опірні (стабілітрони), перемикаючі, фотодіоди, світлодіоди, тунельні діоди тощо.

Випрямні діоди. Робота напівпровідникового випрямного діода заснована на властивості *p-n* переходу пропускати струм тільки в одному напрямку. Основною характеристикою напівпровідникових діодів є вольт-амперна характеристика. Для порівняння на рис. 1.5. приведені типові вольт-амперні характеристики у багато германієвого (1) і кремнієвого (2) діодів. Кремнієві діоди мають разів менші зворотні струми при однаковій напрузі, чим германієві. Припустима зворотна напруга кремнієвих діодів може досягати 1000–1500В в той час як в германієвих вона лежить у межах 100–400В.

Кремнієві діоди можуть працювати при температурах - 60...+150°C, а германієві -60...+85 °C. Це обумовлено тим, що при температурах вище 85 °C різко збільшується власна провідність германія, що приводить до неприпустимого зростання зворотного струму.

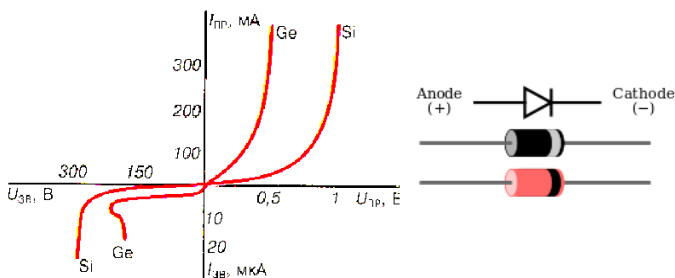


Рисунок. 1.5 – Вольт-амперні характеристики діодів

До основних стандартизованих параметрів випрямних діодів відносяться:

- Середній прямий струм, $I_{пр.ср}$ – середнє за період значення прямого струму.
- Максимально припустимий середній струм, $I_{пр.ср. max}$.

- Середній випрямлений струм, $I_{вп. ср}$ – середнє за період значення випрямленого струму, що протікає через діод (з урахуванням зворотного струму).

- Постійна пряма напруга $U_{пр}$ – значення постійної напруги на діоді при заданому постійному прямому струмі.

- Постійна зворотна напруга $U_{обр}$ – значення постійної напруги, прикладеної до діода в зворотному напрямку.

- Максимально припустима постійна зворотна напруга $U_{обр.ма.}$

- Постійний зворотний струм $I_{обр}$ – значення постійного струму, що протікає через діод у зворотному напрямку при заданій, зворотній напрузі.

- Середній зворотний струм $I_{обр.ср}$ – середнє за період значення зворотного струму.

Діоди Шотткі. Робота діодів, заснована на дії контакту, що випрямляє, метал-напівпровідник. Основна перевага діодів Шотткі в порівнянні з діодами на *p-n*- переходах можливість одержання менших значень прямого опору контакту, тому що металевий шар по цих властивостях перевершує будь-який, навіть сильно легований шар напівпровідника. Малий прямий опір і невелика ємність бар'єра Шотткі дозволяє діодам працювати на надвисоких частотах.

а)



б)



Рисунок 1.6 – Діод Шотткі:
а– умовно-графічне зображення;
б – загальний вигляд

Переходи Шотткі широко використовуються в інтегральних технологіях – як «омічні контакти», опір яких значно менший, в порівнянні з об'ємним опором напівпровідника, та опорами паразитних витоків.

В той час, як звичайні кремнієві діоди мають пряме падіння напруги близько 0,6-0,7 вольт, застосування діодів Шоттки

дозволяє знизити це значення до 0,2-0,4 вольт. У силовій електроніці будують випрямлячі на частоти в сотні кГц і вище. Наприклад, діод MBR4015 (15 В, 40 А), оптимізований під високочастотне випрямлення, нормований для роботи при dV/dt до 10 кВ/мкс.

Діод Зенера (стабілітрон) – різновид діодів, що в режимі прямої напруги, проводять струм як звичайні діоди, а при зворотній напрузі – струм різко зростає тільки в області напруг близьких до пробою («зенерівська напруга»). Прилад отримав назву на честь імені його першовідкривача Кларенса Зенера.

В основі роботи стабілітрона лежать два механізми:

- лавинний пробій p - n - переходу;
- тунельний пробій p - n переходу, також відомий під назвою ефект Зенера.

Незважаючи на схожі наслідки, ці два фізичні механізми принципово відрізняються один від одного. Як правило, домінує один із механізмів пробою. В діодах Зенера, до напруги 5,6 В домінує тунельний пробій, а при великих напругах – домінуючим стає лавинний пробій.

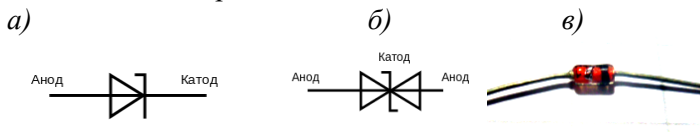


Рисунок 1.7 – Умовно-графічне зображення діода Зенера
а – звичайний; б –двох анодний; в – загальний вигляд.

ВАХ кремнієвого діода в області пробою використовують для стабілізації напруги, а також фіксації напруг і струму в схемах, звідси інша назва кремнієвих стабілітронів – опорні діоди. Робочою ділянкою ВАХ стабілітрона є область пробою p - n переходу при його зворотному вмиканні (рис. 1.8). При обмеженні зворотного струму стан пробою в стабілітроні може підтримуватись і відтворюватись протягом десятків – сотень годин.

Напруга стабілізації – номінальне значення напруги на стабілітроні при заданому зворотному струмі стабілітрона в

області пробою. Напруга стабілізації, приблизно, дорівнює напрузі пробою. У даний час розроблені стабілітрони на стабілізування напруги від одиниць вольт до сотень вольт.

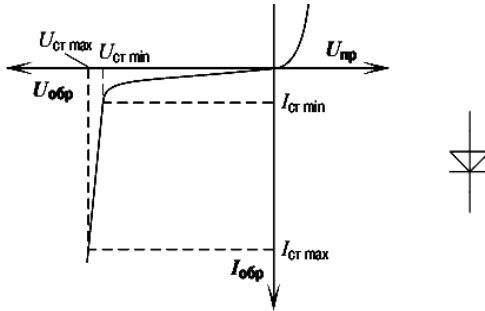


Рисунок 1.8 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона

1.3 Фотодіоди, світлодіоди

Напівпровідниковий фотодіод – напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від освітленості. Зазвичай як фотодіод використовують напівпровідникові діоди з *p-n* переходом, який зміщений у зворотному напрямі зовнішнім джерелом живлення. При поглинанні квантів світла в *p-n* переході або в прилеглих до нього областях утворюються нові носії заряду.

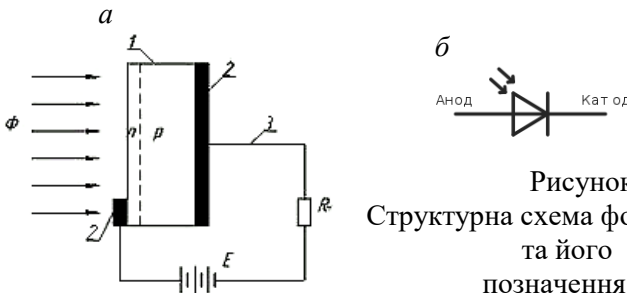


Рисунок 1.9 –
Структурна схема фотодіода (а)
та його
позначення (б):

1– кристал напівпровідника; 2 – контакти; 3 – висновки; Φ – потік електромагнітного випромінювання; E – джерело постійного струму; R_h – опір навантаження.

Світлодіод – це напівпровідниковий прилад, що здатен перетворювати електричну енергію безпосередньо у світлову. За своєю структурою, світлодіод подібний до звичайного напівпровідникового діоду, так само як і будь який напівпровідниковий діод, світлодіод має властивість односторонньої електропровідності, але, при протіканні електричного струму у “прямому” напрямі, на кристалі, в зоні контакту напівпровідників різного типу провідності, виникає світіння.

Звичайні світлодіоди виготовляються з різних неорганічних напівпровідникових матеріалів, в наступній табл. наведені доступні кольору з діапазоном довжин хвиль, падіння напруги на діоді, і матеріал. Вольт-амперна характеристика світлодіодів в прямому напрямку нелінійна. Діод проводить струм починаючи з деякої порогової напруги. Ця напруга дозволяє досить точно визначити матеріал напівпровідника.



Рисунок 1.10 – Світлодіод з пластиковою оболонкою (а) та його позначення (б)

Застосовуються світло діоди в якості індикаторів – як у вигляді одиночних світлодіодів (наприклад, індикатор включення на панелі приладу), так і у вигляді цифрового або буквено-цифрового табло (наприклад, цифри на годиннику).

В якості джерела модульованого оптичного випромінювання (передача сигналу по оптоволокну, пульти ДУ, Інтернет тощо. У вуличному, промисловому, побутовому освітленні тощо.

У порівнянні з іншими електричними джерелами світла (перетворювачами електроенергії в електромагнітне випромінювання видимого діапазону), світлодіоди мають наступні відмінності: Світлодіодні лампи споживають від 3% до 6% потужності, необхідної для звичайних ламп розжарювання, аналогічної яскравості.

Термін служби світлодіодної лампи – більше 100 000 годин (майже 11 років). Використовуючи світлодіоди можна одержати світло з високою насиченістю кольору. Світлодіоди застосовують у індикаційній техніці, при побудові світловодних джерел світла (інформаційні табло, світлофори, ліхтарики, гірлянди тощо).

1.4 SMD діоди

До елементної бази SMT на ряду з резисторами та конденсаторами відносяться діоди та світлодіоди поверхневого монтажу SMT. З дискретних напівпровідникових приладів, призначених для поверхневого монтажу, реальний ефект в електронних пристроях дає застосування компонентів тільки з двома висновками – діодів, стабілітронів, варикапів, світловодів тощо. Для спрощення викладу під діодами надалі будемо мати на увазі всі види напівпровідникових приладів з двома висновками. Один з поширених корпусів – циліндричний скляний -- випускають в двох варіантах: MELF (DO213AB; MLL41) і Mini MELF (SOD80; DO213AA; MLL34).

Зовнішній вигляд цього корпусу показаний на рис. 1.11. Катод діода відзначений темної кругової смугою. Тип діода зазвичай вказують прямий маркуванням на корпусі, проте деякі фірми застосовують свої “особисті” позначення.

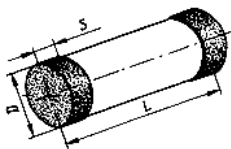


Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд SMD діода

При описі характеристик приладу використовуються деякі параметри, характерні для конкретного приладу. Так, напруга, вказана для випрямляючого діода – це найчастіше максимальна зворотна напруга діода, а для стабілітронів (діодів Зенера – *zener diode*) дається напруга стабілізації. Зазвичай, якщо вказані величини напруги, струму або потужності – це граничні їх значення.

Полярність діода визначає широка смуга контрастного кольору, нанесена на верхню грань корпусу з боку катода. Тут же розміщують маркування типу діода.

Корпуси SMA, SMB і SMC є пластмасовий паралелепіпед з торцевими пластинчастими висновками, прилеглими до корпусу – рис. 1.12. і загнутими під нього.

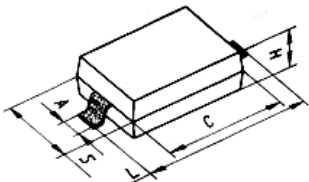


Рис.унок 1.12. –Корпуси SMA, SMB і SMC

SMD світлові діоди. Постійне підвищення потужності світлодіода, для збільшення світлового потоку (яскравості), призвело до зміни традиційної циліндричної форми корпусного пластикового світлодіода. Викликано це тим, що таке конструктивне виконання перестало задовольняти виробників з-за недостатнього тепловідводу від кристала. Тому з метою максимально наблизити SMD чіп до теплопровідної поверхні, на зміну традиційної технології приходить більш досконала SMD. У даний час SMD світлодіоди переступили поріг до сотні ватт і постійно продовжують збільшувати її. Світлодіод, виготовлений за технологією SMD, зображений на рис. 1.13.

Світлодіоди, виконані за технологією поверхневого монтажу, монтуються безпосередньо на загальну підкладку, яка часто виконує роль радіатора (охолодження). Для потужних світильників і прожекторів виготовляються світлодіодні збірки SMD на металевому масивному радіаторі. В окремих випадках, для світлодіодів понад 100 ватт, застосовують навіть примусове охолодження – обдув кулером.



Рисунок 1.13 – SMD світлодіод

2.2. Транзистори

Транзистор (англ. *transfer* – «переносити» і англ. *resistor* – «опір») – напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги. За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні транзистори й польові транзистори.

Біполярні транзистори розрізняються за полярністю: вони бувають *p-n-p* та *n-p-n* типу. Середня літера в цих позначеннях відповідає типу провідності матеріалу бази. Польові транзистори розрізняються за типом провідності в каналі: на *p-канальні* (основний тип провідності – дірковий) та *n-канальні* – основний тип провідності електронний.

Своєрідним гібридом біполярного та польового транзистора є IGBT-транзистор (англ. *Isolated Gate Bipolar Transistor* – біполярний транзистор із ізольованим переходом), що зараз широко використовується в силовій електроніці.

Транзистори розрізняються також за матеріалом, за максимальною потужністю, максимальною частотою, за призначенням, за типом корпусу. Найпоширеніший напівпровідниковий матеріал для виробництва транзисторів – кремній. Використовуються також германій, арсенід галію та інші бінарні напівпровідники. Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювача і у якості перемикача.

2.2.1 Біполярні транзистори

Біполярний транзистор – напівпровідниковий елемент із трьома електродами, один з яких служить для керування струмом між двома іншими. Термін «біполярний» підкреслює той факт, що принцип роботи приладу полягає у взаємодії з електричним полем частинок, що мають як позитивний, так і негативний електричний заряд.

Біполярний транзистор винайшли в 1947 році Джон Бардін і Волтер Браттейн під керівництвом Шоклі із Bell Labs, за що отримали Нобелівську премію з фізики. На рис. 1.14. зображено позначення біполярних транзисторів.

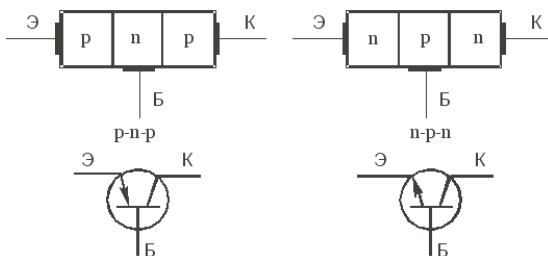


Рисунок 1.14– Умовно-графічне позначення біполярних транзисторів

Виводи біполярного транзистора називаються емітером, (E) базою (B) і колектором (K). В залежності від типу носіїв заряду, які використовуються в транзисторі, біполярні транзистори поділяються на транзистори $n-p-n$ та $p-n-p$ типу. В транзисторі $n-p-n$ типу емітер і колектор легуються донорами, а база – акцепторами. В транзисторі $p-n-p$ типу – навпаки.

На рис. 1.15. показана будова біполярного транзистора $n-p-n$ типу. Колектором служить напівпровідник n -типу, легований донорами до невисокої концентрації $10^{13} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

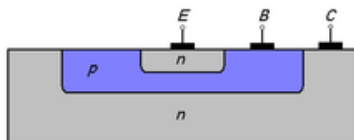


Рисунок 1.15 – Переріз транзистора

Робота біполярного транзистора базується на використанні двох $p-n$ переходів між базою та емітером і базою та колектором.

В області $p-n$ переходів виникають шари просторового заряду, між якими лежить тонка нейтральна база.

Якщо між базою й емітером створити напругу в прямому напрямку, то носії заряду інjektуються в базу й дифундують до колектора. Оскільки вони є неосновними носіями в базі, то легко проникають через $p-n$ - перехід між базою й колектором.

У залежності від способу ізоляції між затвором та каналом розрізняють наступні типи польових транзисторів:

- польові транзистори з керуючим переходом (ізоляція затвора від каналу відділяється збіднілим шаром p - n переходу);
- транзистори з металево-напівпровідниковим затвором або затвором Шотткі;
- транзистори з ізольованим затвором (МДН- або МОН-транзистори) затвор ізольований від каналу шаром діелектрика.

Із розробкою технології інтегральних схем польові транзистори майже повністю витіснили біполярні транзистори з більшості галузей електроніки.

Найпростіший польовий транзит-тор становить тонку пластинку напівпровідникового матеріалу з одним p - n переходом у центральній частині та з не випрямляючими контактами по краях (рис. 1.17). Дія цього приладу ґрунтується на залежності товщини p - n переходу від прикладеної до нього напруги.

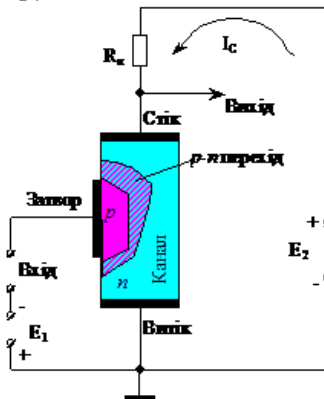


Рисунок 1.17 – Структура польового транзистора

Оскільки p - n перехід (запірний шар) майже цілком позбавлений рухомих носіїв заряду, його провідність практично рівна нулеві. Таким чином, у пластинці напівпровідника утвориться струмопровідний канал, перетин якого залежить від товщини p - n переходу (запінного шару). Якщо увімкнути джерело живлення E_2 , як зображено на рис. 1.17, то через пластинку напівпровідника між не випрямляючими контактами потече струм.

Область, від якої починають рух основні носії, називається витоком (B), а область, до якого вони рухаються через канал – стоком (C). Джерело E_1 створює негативну напругу на затворі (З), що спричиняє збільшення товщини p - n - переходу та зменшення перетину каналу.

Зі зменшенням перетину каналу збільшується опір між витоком і стоком та знижується величина струму I_c . Зменшення напруги на затворі викликає зменшення опору каналу і зростання струму I_c . Отже, струм, що протікає через канал, можна модулювати сигналами, позитивними відносно затвора.

Оскільки p - n перехід затвора увімкнений у зворотному напрямку, вхідний опір приладу дуже великий.

Негативна напруга, яка прикладена до затвора (відносно витоку), може викликати таке розширення p - n переходу, при якому струмопровідний канал виявиться перекритим. Ця напруга називається граничною (або напругою відсічки).

Прилади даного типу називаються польовими (канальними) транзисторами з керуючим p - n переходом.



Рисунок 1.18 – Умовно-графічне позначення польового транзистора:

а – з p - n - переходом і каналом n -типу;

б – каналом p – типу

Вольт-амперні характеристики польових транзисторів з p - n - переходом. Для цих транзисторів представляють інтерес два види вольт амперних характеристик: стоківі і стокозатворні.

Стоківі характеристики польового транзистора з p - n - переходом і каналом n -типу показані на рис. 1.19. Вони відображають залежність струму стоку від напруги U_{cu} при фіксованій напрузі U_{zu} : $I_c = f(U_{ce})$ при $U_{ze} = const$.

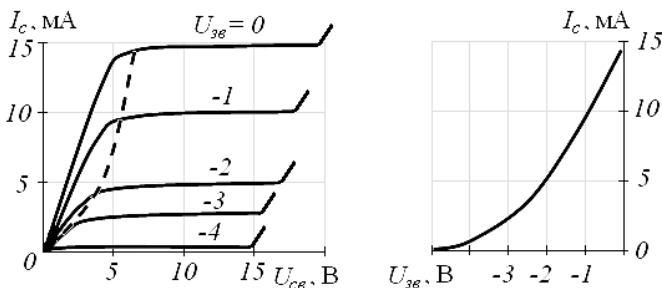


Рисунок 1.19 – Вольт-амперні характеристики польового транзистора з p - n - переходом і каналом n -типу:

а – стокові (вихідні);

б – стоко-затворна.

Основні параметри польового транзистора

Максимальний струм стоку $I_{c \max}$ (при $U_{зв} = 0$).

Максимальна напруга стік-витік $U_{cu \max}$.

Напруга відсічення $U_{зв}$.

Внутрішнє (вихідна) опір r_i - являє собою опір транзистора між стоком і виток (опір каналу) для змінного струму:

$$r_i = \frac{\Delta U_{cs}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зв} = \text{const.} \quad (1.1)$$

Крутизна стоко-затворної характеристики відображає вплив напруга затвора на вихідний струм транзистора і визначається за формулою:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \text{ при } U_{cs} = \text{const.} \quad (1.2)$$

Вхідний опір при $U_{cs} = \text{const}$ транзистора визначається опором p - n - переходів, зміщених у зворотному напрямку. Вхідний опір польових транзисторів з p - n - переходом досить великий (досягає одиниць і десятків мегом), що вигідно відрізняє їх від біполярних транзисторів. Загальний вигляд польових транзисторів подібний до біполярних.

Польові транзистори з індукованим каналом. У даний час широке поширення одержали польові транзистори з ізолюваним затвором, так звані МДН- транзистори (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОН- транзистори (метал-окисел-напівпровідник). В транзисторах з ізолюваним затвором модуляція провідності каналу здійснюється за допомогою металевого електрода, відділеного від каналу тонким шаром діелектрика. Конструкція схематично наведена на рис. 1.20.

Основою транзистора становить пластинка (підкладка) зі слаболегованого кремнію з p - провідністю. Стік і витік володіють n - провідністю. Між ними проходить вузька слаболегована смужка кремнію з n - провідністю (канал). Затвор виконується у виді металевої пластинки, яка ізолювана від каналу шаром діелектрика.

При негативній напрузі на затворі електрони провідності, “виштовхуються” з області каналу в об’єм напівпровідника підкладки. При подачі на затвор позитивної напруги відбувається “втягування” електронів провідності з підкладки в канал.

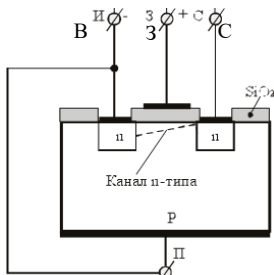


Рисунок 1.20 – Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом

Отже, зміна напруги на затворі викликає зміну провідності каналу (і, відповідно, струму, який протікає через цей канал). При протіканні струму через канал потенціал стоку підвищується. Це викликає збіднення основними носіями (електронами) області каналу, розташованої поблизу стоку, що рівносильне звуженню ефективного перетину каналу транзистора з керуючим p - n - переходом. У такий спосіб на відміну від польового транзистора з керуючим p - n переходом транзистор з ізолюваним затвором може працювати з нульовим, негативним або позитивним зміщенням.

Іншою важливою перевагою польових транзисторів з ізолюваним затвором є дуже високий вхідний опір, обумовлений опором ізолюючого прошарку між затвором і каналом. На рис. 1.21. зображено умовно-графічне позначення польових транзисторів.

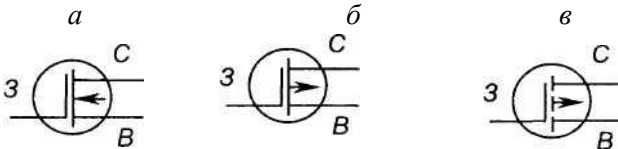


Рисунок 1.21 – Умовно-графічне позначення польових транзисторів:

а - з вбудованим каналом n -типу; б - з вбудованим каналом p -типу; в - з індукованим каналом p -типу.

Потрібно зазначити, що виготовлення польових транзисторів за планарно-епітаксальною технологією порівняно нескладне і спрощує створення мікроелектронних схем. Особливо просто виготовляються МДН- транзистори з індукованим каналом, оскільки в кристалі треба зробити лише дві області витоку і стоку.

Для запам'ятовуючих пристроїв створені МДН- транзистори з діелектриком, що складається з двох шарів.

2.2.3 СІТ-транзистори

У середині 70-х років минулого століття багаторічні дослідження (Японія, США) завершилися створенням транзистора із статичною індукцією – СІТ-транзистора. Цей транзистор, будучи по суті ПТ з керуючим p - n переходом, є твердотільним аналогом електронно-вакуумної лампи – тріода, у якої вихідна характеристика при нульовому значенні сигналу керування за формою нагадує характеристику p - n переходу.

На відміну від площинної горизонтальної конструкції ПТ з керуючим p - n - переходом, СІТ-транзистор має вертикальну конструкцію.

Наприклад, p -шари затвору вводяться в шар вертикально. Таке виконання забезпечує приладу роботу при напругах до

2000 В й частотах до 500 кГц. А розміщення на одному кристалі великого числа елементарних транзисторів з наступним їх паралельним з'єднанням забезпечує робочі струми до 500 А – це вже є силовим електронним приладом. Умовно-графічне позначення СІТ-транзистора зображено на рис. 1.22.

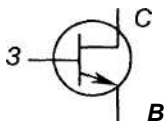


Рисунок 1.22 –Графічно-Умовне позначення СІТ транзистора

Крім роботи в режимі ПТ, цей транзистор може працювати в режимі БТ, коли на затвор подається додатне зміщення.

2.2.4 Транзистори БТІЗ

Біполярні транзистори з ізольованим затвором (БТІЗ, з'явилися у 80-х роках минулого століття і тепер інтенсивно використовуються в якості силових приладів, витісняючи у багатьох застосуваннях тиристори.

Структура, умовно-графічне позначення та еквівалентна схема БТІЗ зображено на рис. 1.23.

БТІЗ являє собою складну багатошарову структуру, створення якої стало можливим з розвитком інтегральної технології: це вже, фактично, інтегральна мікросхема. Він поєднує властивості МОН-транзистора щодо керування з властивостями біполярного транзистора в силовому колі.

Такі транзистори використовуються для напруг до 1200 В при частоті до 100 кГц та сили струму до 2000 А, що забезпечується паралельним з'єднанням великого числа елементарних транзисторів на одному кристалі (як у випадку СІТ- транзистора).

Вони продукуються у вигляді модулів, у яких міститься від одного до трьох транзисторів, що дозволяє зменшити габарити електронних пристроїв.

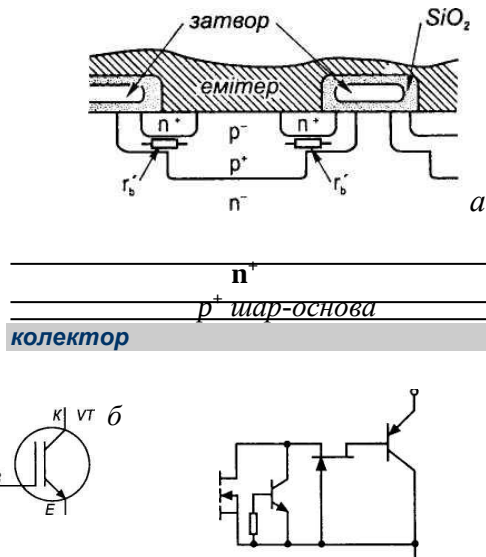


Рисунок 1.23 – Структура (а), умовне позначення (б) та еквівалентна схема (в) БТІЗ

2.2.5 SMD транзистори

Сучасна електронна апаратура будується в основному тільки на так званих чіп компонентах – це чіп резистори, конденсатори, діоди, транзистори мікросхеми тощо. Велику долю з перерахованого становлять якраз транзистори різних типів та призначення. Деякі типи транзисторів мають вбудовані резистори, в цьому випадку під базовим резистором розуміється резистор, з'єднаний послідовно з базою.

У SMD транзисторів як і у звичайних, є безліч видів: (Дарлінгтон), польові, біполярні і IGBT (біполярні транзистори з ізолюваним затвором).

Транзистори в SMD корпусі, дуже зручні, особливо де кожен міліметр плати важливий. Уявіть, як би змінився мобільний телефон (плата якого повністю з SMD деталей), якби там використовували звичайні вивідні DIP деталі.

На рис. 1.24 зображені транзистори в різних SMD корпусах.

Одним з найважливіших технологічних матеріалів, що застосовуються при поверхневому монтажі SMD транзисторів, є паяльна паста, що являє собою суміш порошкоподібного припою з органічними наповнювачами, до яких входить флюс.

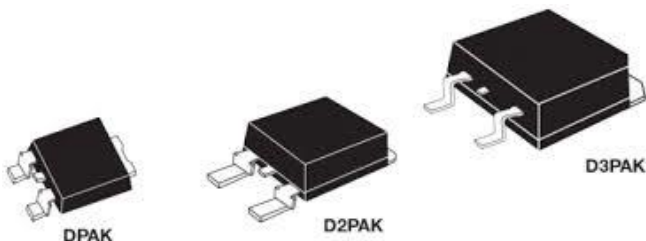


Рисунок 1.24 – SMD транзистори

3.1 Тиристори

Тиристор – перемикальний напівпровідниковий прилад, що проводить струм тільки в одному напрямку. Класифікація і умовні графічні позначення тиристорів приведені на рис. 1.25.

Цей прилад часто порівнюють з керованим діодом і називають напівпровідниковим керованим вентилям (англ. *Silicon Controlled Rectifier, SCR*).

Тиристор має три виходи, один з яких – керуючий електрод – використовується для різкого переходу тиристора у включений стан.

Тиристор суміщає в собі функції випрямляча, вимикача і підсилювача. Часто він використовується як регулятор, головним чином, коли схема живиться змінною напругою.

Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення тиристорів служить кремній.

Коефіцієнт підсилення по струму досягає біля одного мільйона, що спрощує схеми керування.

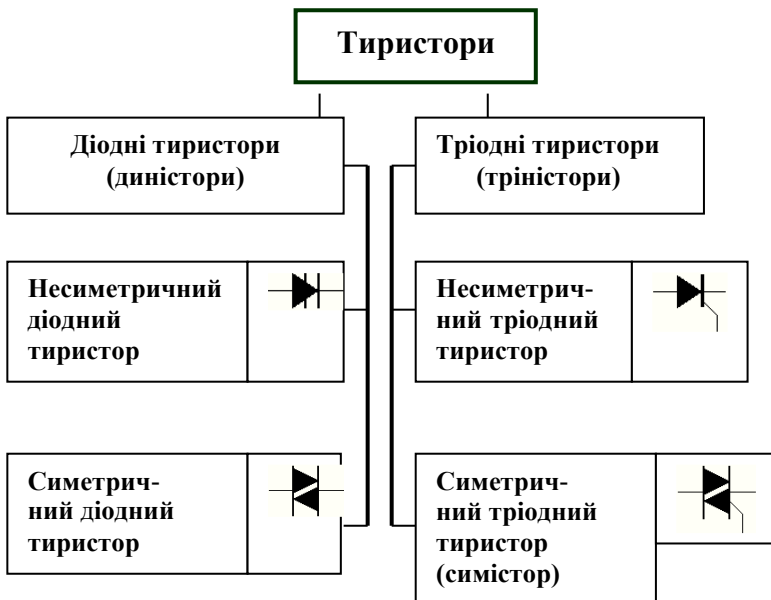


Рисунок 1.25 – Класифікація тиристорів

3.3.1 Тріністор

Найпростішим тиристором із двома виводами є *діодний тиристор (диністор)*.

Тріодний тиристор (*тріністор*) – має додатково третій (*керуючий*) електрод. Як діодний, так і тріод- ний – тиристори мають чотиришарову структуру із трьома p - n - переходами $П1$, $П2$, $П3$ (рис. 1.26).

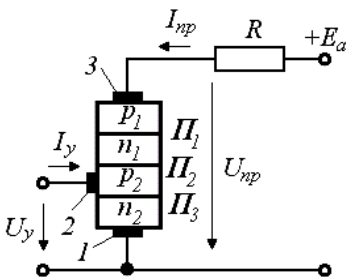


Рисунок 1.26 – Структура тріністора

Напруга живлення подається на тиристор таким чином, що переходи PI і $PI3$ виявляються відкритими, а перехід $PI2$ – закритим. Опір відкритих переходів незначний, тому майже вся напруга живлення U_{np} прикладена до закритого переходу $PI2$, що має високий опір. Отже, струм тиристора малий.

3.3.2 Симістори

Симістор (симетричний тріодний тиристор) або TRIAC (від англ. TRIAC – triode for alternating current) – напівпровідниковий прилад, є різновидом тиристора, використовується для комутації в ланцюгах змінного струму. У електроніці часто розглядається як керований вимикач (ключ).

За способом включення відносно керуючого електрода основні виводи симістора розрізняються, причому має місце їх аналогія з катодом і анодом тиристора.

На рис. 1.27 – верхній за схемою вивід симістора називається умовним катодом, нижній – умовним анодом, вивід праворуч – керуючим електродом.



Рисунок 1.27 – Умовно-графічне позначення (а) та зовнішній вигляд симісторів (б)

Симістор має п'ятишарову структуру напівпровідника (рис. 1.28). Спрощено симістор можна представити у вигляді еквівалентної схеми з двох тріодних тиристорів, включених зустрічно-паралельно. Для вимикання симістора на його керуючий електрод подається напруга щодо умовного катода.

Полярність керуючої напруги, як правило, повинна збігатися з полярністю напруги на умовному аноді. Тому часто використовується такий метод управління симістором, при

якому сигнал на керуючий електрод подається з умовного анода через струмообмежувальні резистор і вимикач.

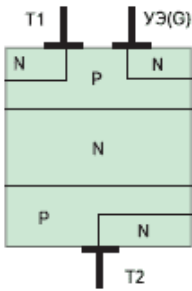


Рисунок 1.28 – Структура симістора

Управляти симістором – це вибір певної сили струму керуючого електрода, достатньої для відкриття симістора. Деякі типи симісторів можуть відпиратися сигналом будь-якої полярності, хоча при цьому може знадобитися більший керуючий струм.

3.3.3. Фототиристори та оптотиристори

Фототеристор – це фотоелектричний напівпровідниковий приймач випромінювання, принцип дії якого ґрунтується на ефекті фотопровідності – явищі зменшення опору напівпровідника у разі збудження носіїв заряду світлом. Фізика роботи фототиристора підпорядковується тим же законам, що і робота триод-тиристора, коли в якості керуючого сигналу використовується світло.

Принцип роботи фототиристора полягає в залежності напруги від освітленості. За відсутності освітлення ($\Phi = 0$) фототиристор закритий. Вся напруга ЕАК падає на ньому, через що опір навантаження R_H знеструмлений. При освітленні світловий потік Φ падає на одну з баз, через що в базі генеруються електрони та дірки. Виключити тиристор можна тільки зняттям напруги живлення. Вольт-амперні характеристики фототиристора мають такий же вигляд, як характеристики звичайних тріод-тиристорів.

Оптотиристор – це тиристор, який управляється променями які випромінює світлодіод. Основна перевага оптотиристора перед звичайним тиристором – це гальванічна розв'язка силового-го кола від кола управління. Оптотиристор можна умовно розбити на дві частини: світлодіод і фото тиристор (рис. 1.29). Оптотиристор має чотирьохшарову структуру $p-n-p-n$ (три $p-n$ переходи).

При подачі на нього напруги U , середній $p-n$ перехід буде закритий. Чим більший струм управління (сила світла), тим менша напруга необхідна між анодом і катодом для відкриття оптотиристора. У відкритому стані, коли падіння напруги між А і К мале, а струм великий – тиристор не управляється. Для того щоб його відключити, треба зняти напругу живлення U .

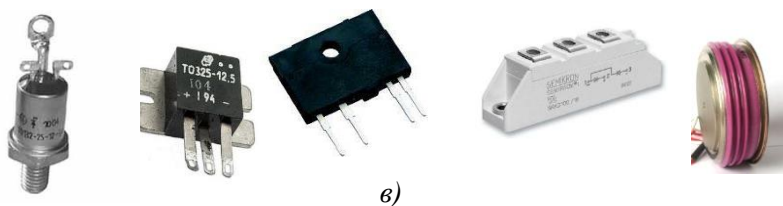
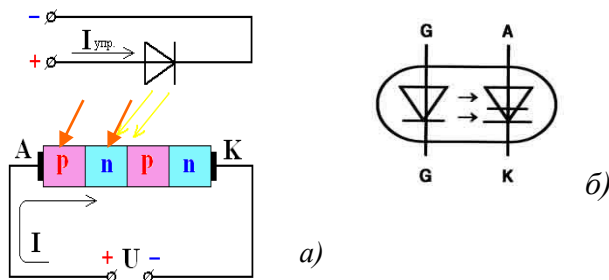


Рисунок 1.29 – Оптотиристри:
а– структура; б – умовно-графічне позначення;
в – загальний вигляд

Промисловістю випускаються також закриваючі тиристри GTO (*Gate turn-off Thyristor*). На відміну від звичайних тиристорів, ними можна управляти не знімаючи напруги U . Для відкриття GTO-тиристора на керуючий електрод дають додатну напругу, для закривання – від'ємну. Такі тиристри

(двох операційні) розраховані на великі струми і мають великі розміри.



Запитання для самоперевірки

1. Що собою уявляє напівпровідниковий діод і який принцип його роботи?
2. Для яких цілей використовують діоди Зенера?
3. Які існують діоди поверхневого монтажу?
4. Що уявляє собою транзистор?
5. На які поділяються транзистори за будовою та принципом дії?
6. Які переваги SMD транзисторів для печатного монтажу?
7. Що собою уявляє тиристор та яка його область використання?
8. Що покладено за основу роботи тиристора?
9. Які переваги симістора над триністором?

Розділ 2

ПІДСИЛЮВАЧІ ТА ГЕНЕРАТОРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Загальні уявлення

Класифікація підсилювачів електричних сигналів

Підсилювач електричних сигналів змінного струму

Каскади підсилення на польових транзисторах

Підсилювачі потужності

Багатокаскадні підсилювачі

Операційні підсилювачі

Електронні генератори. Загальні відомості

Принцип отримання незатухаючих гармонійних коливань

RL-автогенератори

RC-автогенератори

2.1. Загальні уявлення

Підсилювачами називають пристрої, які призначені для підсилення періодичних та постійних за струмом сигналів.

Умовно підсилювачі поділяються на:

- ✓ підсилювачі напруги;
- ✓ підсилювачі струму;
- ✓ підсилювачі потужності.

Підсилювачі характеризуються вхідними та вихідними параметрами.

До вхідних параметрів підсилювача належать: вхідна напруга, струм, потужність та вхідний опір.

До вихідних – вихідна потужність, опір, напруга та вихідний струм. Підсилювальні властивості підсилювача характеризують коефіцієнти підсилення по напрузі, струму та потужності.

Коефіцієнт підсилення напруги визначають за формулою:

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}; \quad (2.1)$$

Коефіцієнт підсилення струму потужності:

$$K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}} ; \quad (2.2)$$

Коефіцієнт підсилення потужності:

$$K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} . \quad (2.3)$$

Значення K_P не можна виразити як добуток $K_U \cdot K_I$, може досягати сотні тисяч, тому на практиці, для оцінки значень модулів коефіцієнтів підсилення використовують логарифмічну шкалу, одиницею якої є децибел (Дб) тоді в цьому разі:

$$K_P = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = 10 \lg K_P \quad (2.4)$$

$$K_U = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = 20 \lg K_U \quad (2.5)$$

$$K_I = 20 \lg \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}} = 20 \lg K_I \quad (2.6)$$

Для забезпечення потрібного підсилення підсилювачі складаються з кількох каскадів, що мають спільні властивості.

Якщо коефіцієнти підсилення каскадів виражені в децибелах, то загальний коефіцієнт підсилювача дорівнює сумі коефіцієнтів підсилення окремих каскадів.

2.2. Класифікація підсилювачів електричних сигналів

На практиці застосовують різні схеми підсилювачів постійних та змінних струмів та режимів їх роботи.

2.2.1. Підсилювач електричних сигналів змінного струму

Розрізняють три схеми вмикання транзисторів: з спільним емітером, спільним колектором та спільною базою. Назва схеми зазначає, який електрод є спільним для вхідного та вихідного кола. Також розрізняють три основні режими роботи підсилювального каскаду – режими класів *A*, *B* и *C*. На рис. 2.1. зображена схема однокаскадного підсилювача змінного струму.

Резистивний дільник напруги R_1, R_2 формує на вході транзистора постійну напругу $U_{зм}$, яка утворює робочий режим транзистора. Конденсатори C_1, C_2 відокремлюють постійну складову напругу сигналу від змінної. Така схема легко може бути використана для створення багато каскадного підсилювача. Наявність розділювальних конденсаторів призводить до залежності комплексного опору підсилювача від частоти вхідного сигналу.

У режимі класу А початкове положення робочої точки вибирають посередині ділянки динамічної характеристики, де зміни базового (вхідного) струму відповідають пропорційні зміни колекторного (вихідного) струму, а її переміщення, викликане впливом подвійної амплітуди вхідного сигналу $2U_{ом}$ ($2I_{ом}$), обмежується цією ділянкою.

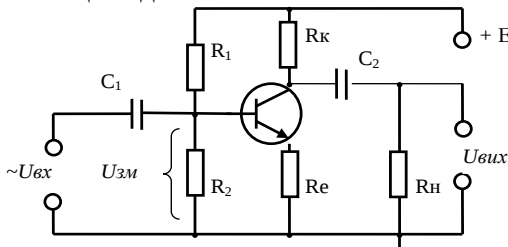


Рисунок 2.1 – Схема підсилювача змінного струму

На рис. 2.2. ця ділянка відзначена лінією CD на вихідній характеристиці, і $C'D'$ – на вхідній (рис. 2.3).

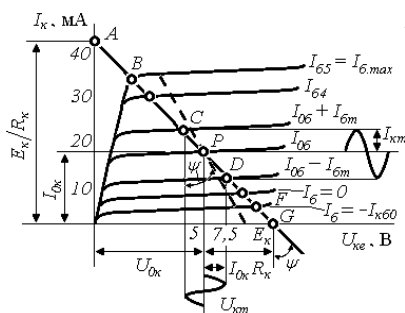


Рисунок 2.2– Вихідна характеристика транзисторного каскаду

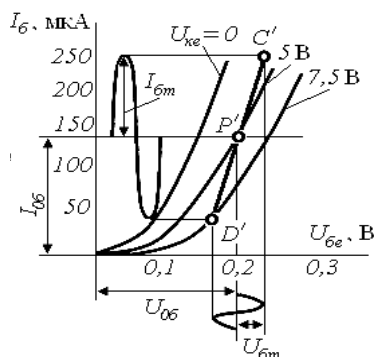


Рисунок 2.3— Вхідна характеристика транзисторного каскаду

ККД підсилювачів у режимі класу *A*, які зазвичай використовуються як вхідні або малопотужні вихідні каскади, не перевищує 20–30%.

У режимі класу *B* початкове положення робочої точки на динамічній характеристиці вибирають при струмі колектора, близькому $I_{к0}$ (рис. 2.4).

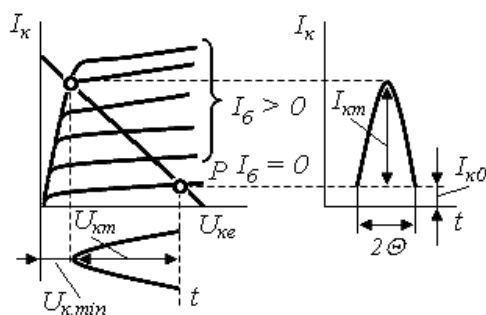


Рисунок 2.4 – Вихідна та вхідна характеристики транзисторного каскаду в режимі класу *B*

Тому при наявності змінного вхідного сигналу змінна складова колекторного струму з амплітудою $I_{км}$ проходить лише протягом половини періоду сигналу, а в іншу половину періоду транзистор замкнений.

Транзистор працює з відсіканням струму. При цьому кут відсікання струму θ під яким розуміють половину часу за період проходження струму через транзистор, приблизно дорівнює $\pi/2$.

Важливою особливістю режиму класу В є високий ККД підсилювача, що досягає 60–70%. В деяких випадках застосовується проміжний (між класами А і В) режим АВ, що характеризується кутом відсікання в $(120\text{--}130^\circ)$ і меншими нелінійними спотвореннями, проте є більш економічним, ніж режим класу А.

2.2.2 Каскади підсилення на польових транзисторах

Польовий транзистор, що має, як і біполярний транзистор, три зовнішніх виводи, може бути увімкнений в підсилювальну схему за трьома різними схемами: із спільним витокom (СВ), спільним стоком (СС) і спільним затвором (СЗ). Найбільш широке застосування на практиці знайшла схема зі СВ аналогічна варіанту схеми з СЕ біполярного транзистора.

На рис. 2.5. зображена схема підсилювального каскаду на польовому транзисторі із затвором у вигляді керуючого p - n -переходу, в якій використовується одне джерело живлення E_c .

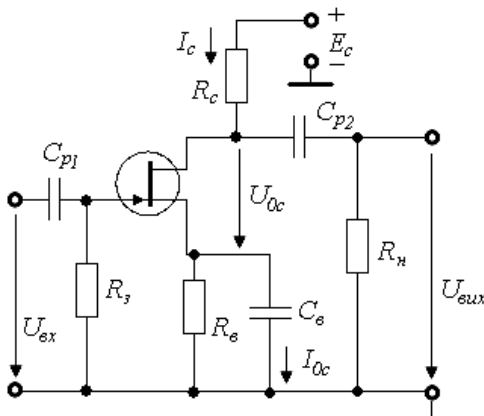


Рисунок 2.5 – Каскад підсилення на польовому транзисторі

Початковий режим роботи польового транзистора забезпечується постійним струмом стоку I_{0c} і відповідною йому постій-

ною напругою на стоці U_{0c} (для біполярного транзистора I_{0k} і U_{0k}). Струм I_{0c} у вихідному (стоковому) колі встановлюється за допомогою джерела живлення E_c і початкової напруги зсуву на затворі U_{0z} від'ємної полярності щодо джерела (для польового транзистора з каналом p - типу – додатної полярності).

2.2.3 Підсилювачі потужності

Вихідні каскади проектують як в однокатному, так і у двотактному виконанні. Однокатні каскади, зазвичай, працюють в режимі класу А, двотактні – в режимі класу В або АВ. З усіх варіантів двотактна схема в режимі класу В є найбільш економічною, що забезпечує відносно великі рівні вихідної потужності. Однокатну схему застосовують при відносно малих вихідних потужностях. При відносно невеликих рівнях вихідної потужності широко практикують безпосереднє під'єднання навантаження у вихідне коло транзистора вихідного каскаду. Такі підсилювачі називають без трансформаторними вихідними каскадами.

Тенденція до мініатюризації електронних пристроїв призвела до розробки двотактних підсилювачів з безтрансформаторним виходом (рис. 2.6). Найбільш широке застосування знаходять вихідні каскади як у дискретному, так і в інтегральному виконанні, побудовані на різнотипних транзисторах: p - n - p і n - p - n .

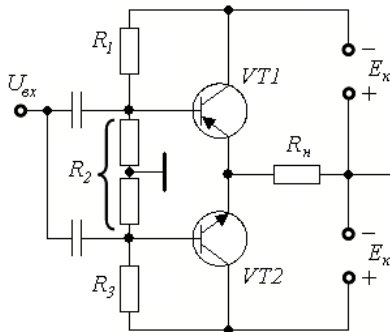


Рисунок 2.6 – Безтрансформаторний вихідний каскад

Такі вихідний каскад має послідовне живлення і паралельне увімкнення навантаження. Зсув за постійним струмом здійснюється подільником $R_1 - R_3$. Оскільки обидва транзистора в схемі увімкнені відносно навантаження як емітерні повторювачі, узгодження вихідного опору підсилювача з опором навантаження (зазвичай низькоомного) значно спрощуються і ККД схеми може виявитися досить високим.

2.4.4 Багатокаскадні підсилювачі

Багатокаскадні підсилювачі застосовують у тих випадках, коли один каскад не забезпечує заданого підсилення за напругою, струмом або потужністю. Структурна схема багатокаскадного підсилювача, що містить n каскадів, зображена.

Одна з типових схем двокаскадного підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком наведена на рис. 2.7. Напруга, підсилена першим каскадом на транзисторі VT_1 , знімається з колектора цього транзистора й передається через розділовий конденсатор C_{p2} на вхід другого каскаду на транзисторі VT_2 .

Навантаженням першого каскаду є вхідний опір другого каскаду. Навантаження R_n підсилювача під'єднують до виходу другого каскаду. Призначення конденсаторів C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} – пропускають тільки змінну складову сигналів.

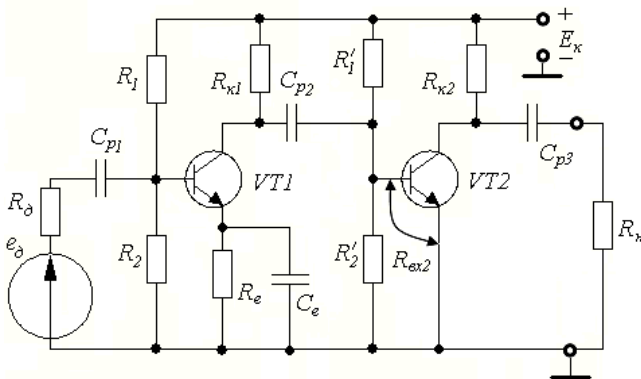


Рисунок 2.7 – Транзисторний двокаскадний підсилювач із резистивно-ємнісним зв'язком

У багатьох випадках вторинні параметри підсилювача не задовольняють поставленим вимогам відносно стабільності підсилення, значень вхідного і вихідного опорів, рівня лінійних і нелінійних спотворень тощо. Поліпшити характеристики й параметри підсилювача можна за допомогою зворотного зв'язку, тобто штучного кола, яким частина сигналу з виходу підсилювача направляється на його вхід, змінюючи режим вхідного кола.

2.3. Операційні підсилювачі

Операційний підсилювач, ОП (англ. operational amplifier) підсилювач постійного струму з диференційним входом, що має високий коефіцієнт підсилення, які використовувалися в аналоговій обчислювальній техніці для виконання операцій алгебраїчного додавання, віднімання, множення, ділення, диференціювання, інтегрування, логарифмування і тощо. За призначенням ОП поділяються на: інвертуючі, неінвертуючі, диференційні, сумуючі, інтегруючі тощо.

Ідеальний ОП має надзвичайно високий коефіцієнт підсилення по напрузі і великий вхідний опір, який здатний підсилювати широкий спектр частот аж до постійної складової.

Дрейф нуля ОП дуже малий тому, що основними каскадами в ОП є диференційні підсилювачі. Оскільки в ОП використовують диференційні підсилювачі, в цьому разі мають два входи – прямий та інвертуючий.

На (рис. 2.7,а) зображена функціональна схема ОП, а на (рис. 2.7,б) – його передавальна характеристика. Живлення здійснюється від двох однакових джерел з'єднаних послідовно.

Граничне значення напруги на виході ОП $/U_{\text{вих.max}}/ = (0,9...0,95 E_{\text{ж}})$. Лінійна ділянка АВ передавальної характеристики ОП обмежена дуже малим значенням вхідних сигналів.

При вхідному сигналі, який виходить за межі допустимих значень, вихідна напруга досягне рівня насичення і лишається незмінною.

Коефіцієнт підсилення K_u ОП залежить від режиму роботи і, в першу чергу від температури отруючого середовища і значення напруги живлення. Тому, безпосередньо як підсилю-

вач, ОП використовують лише за умови наявності зворотних зв'язків між виходом ОП і його входом.

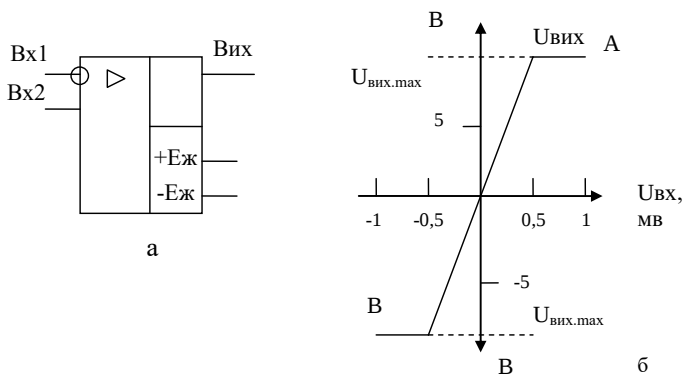


Рисунок 2.8 – Операційний підсилювач:

а) функціональна схема ОП;

б) передавальна характеристика ОП.

Інвертуючий підсилювач. На рис. 2.9. зображена принципова електрична схема інвертуючого підсилювача на базі ОП. Виводи, до яких прикладені напруги $\pm E_{ж}$ в зображених підсилювачах прийнято не з виходу ОП на інвертуючий вхід подається напруга зворотного зв'язку $U_{зз}$. Оскільки напруга $U_{зз}$ подається на інвертуючий вхід, тоді вихідна напруга буде визначатися різницею $U_{вх} - U_{зз}$. Такий зворотний зв'язок називається від'ємний. Неінвертуючий вхід може бути з'єднаний з загальною шиною ($\perp$), або за допомогою резистора R_3 , значення якого потрібно визначити за виразом:

$$R_3 = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.7)$$

Опір навантаження R_n повинен бути набагато більший за вихідний опір ОП ($R_n \gg R_{вих}$), а вхідний опір ОП значно більший за R_1 . Такі умови властиві реальним ОП. Вихідна напруга $U_{вих}$ підсилювального каскаду на ОП буде дорівнювати:

$$U_{вих} = U_{вх} \cdot K_U,$$

де K_U – коефіцієнт підсилювання каскаду за наявності зворотного зв'язку.

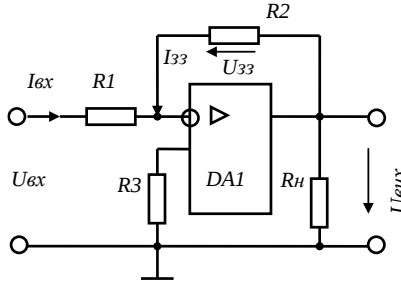


Рисунок 2.9 – Принципова електрична схема інвертуючого підсилювача на базі ОП

Таким чином, напруга на виході інвертуючого підсилювача залежить практично тільки від співвідношення значень резисторів R_1 та R_2 , які виконують функцію дільника напруги з виходу на вхід ОП. Тоді:

$$U_{вх} = R_1 \cdot I_{вх} = R_1 \cdot i_{вх}, \quad U_{вих} = R_2 \cdot I_{вих}.$$

Звідси можливо отримати коефіцієнт підсилення схеми:

$$K_U = U_{вих} / U_{вх} = -R_2 / R_1.$$

Остаточно запис вихідної напруги підсилювача має вигляд:

$$U_{вих} = -U_{вх} (R_2 / R_1) \quad (2.8)$$

Знак мінус вказує, що полярність вхідної і вихідної напруги є протилежними і тому схема підсилювача отримала назву інвертуючої.

З введенням від'ємного зворотного зв'язку (ВВЗ) можна поліпшити деякі параметри неінвертуючого підсилювача такі як: стабільність коефіцієнту підсилення; підвищення вхідного

каскаду з зменшенням його вихідного; розширити лінійну ділянку передавальної характеристики; зменшення спотворення передачі сигналів з входу на вихід, тощо. Все це здійснюється за зниження коефіцієнту підсилення ОП.

Неінвертуючий підсилювач. Цей підсилювач використовує паралельний зворотний зв'язок за напругою з виходу на інвертуючий вхід (рис. 2.10)

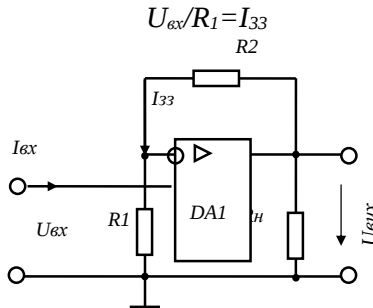


Рисунок. 2.10 – Принципова електрична схема неінвертуючого підсилювача на базі ОП

Оскільки $U_0 = 0$, то $U_{R1} = U_{вх}$, а $U_{вх}/R1 = I_{33}$.
З іншого боку:

$$I_{33} = U_{вих} / (R2 + R1).$$

Отже, $U_{вх}/R1 = U_{вих} / (R1 + R2)$,
звідси:

$$U_{вих} = U_{вх} (1 + R2/R1). \quad (2.9)$$

В цьому випадку коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача буде дорівнювати:

$$K_U = U_{вих} / U_{вх} = 1 + R2/R1. \quad (2.10)$$

Якщо $R_2 = 0$, а $R_1 \rightarrow \infty$, тоді неінвертуючий підсилювач перетвориться в неінвертуючий повторювач, схема якого зображена на рис. 2.11.

Неінвертуючі та інвертуючі підсилювачі широко використовуються як високо стабільні підсилювачі різного призначення.

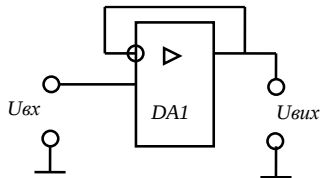


Рисунок 2.11 – Повторювач напруги

В аналогових обчислювальних машинах були розповсюджені схеми такі як: інвертуючий та неінвертуючий суматори; інтегруючий та диференціюючий підсилювачі, компаратори, тощо.

Інтегруючий підсилювач. Схема інтегруючого підсилювача (інтегратора) зображена на рис. 2.12.

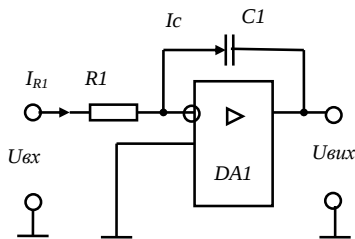


Рисунок 2.12 – Інтегратор

Вона створюється заміною, в схемі інтегруючого підсилювача, Резистора зворотного зв'язку R_2 на конденсатор C_1 .

Оскільки $I_{R1}=I_{C1}$ або $\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = -C \frac{dU_{\text{вих}}}{dt}$, то в цьому випадку:

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{\text{вх}} dt, \quad (2.11)$$

де $R_1 \cdot C_1 = \tau$ – постійна часу.

При подачі на вхід ОП постійної напруги, струм I_{C1} має сталу величину $U_{\text{вх}}/R_1$, конденсатор в цьому випадку заряджається рівномірно, а вихідна напруга зростає за лінійним законом. Тому інтегратор часто застосовують в якості генератора лінійних напруг (ГЛН).

Підсилювач змінного струму на ОП. На рис. 2.13. зображена схема підсилювача сигналів змінного струму на ОП з однополярним джерелом живлення. Для того, щоб забезпечити позитивну роботу підсилювача, потрібно на інвертуючий вхід ОП подати напругу зміщення ($U_{\text{зм}} = E_{\text{жс}}/2$). Ця напруга формується за допомогою дільника R_1, R_2 ($R_1=R_2$). C_1, C_2 – розділяючі конденсатори. Дільник сигналу зворотного зв'язку забезпечує коефіцієнт підсилення:

$$K_U = R_4/R_3. \quad (2.12)$$

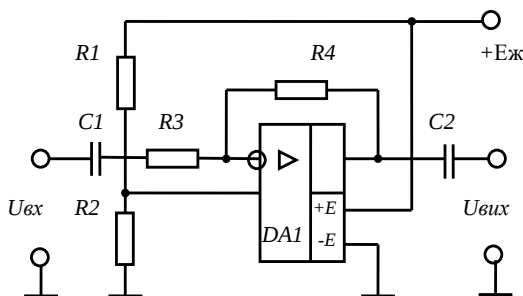


Рисунок 2.13 – Підсилювач змінного струму з однополярним живленням

На рис. 2.14. зображено різноманітні операційні підсилювачі, як в окремих корпусах, так і декілька в одному.

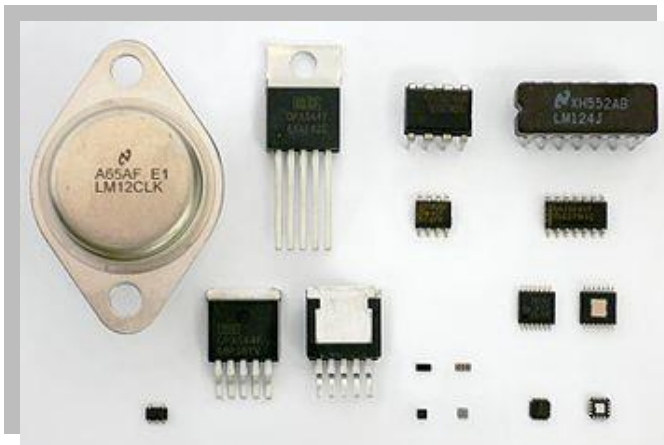


Рисунок 2.14 – Загальний вигляд операційні підсилювачів

2.4. Електронні генератори. Загальні відомості

Електронні генератори гармонічних коливань знайшли широке застосування в електроніці. Їх використовують у приладах для контролю складу і якості різних речовин, в установках для високочастотного нагрівання металів, сушіння і зварювання діелектриків, термічної обробки виробів тощо.

Електронні генератори гармонічних коливань класифікують за рядом ознак, основними з яких є частота і спосіб збудження. Залежно від частоти генератори поділяють на:

- *низькочастотні* (0,01–100 кГц);
- *високочастотні* (0,1–100 МГц);
- *надвисокочастотні* (понад 100 МГц).

. За способом збудження розрізняють генератори із зовнішнім збудженням і з самозбудженням. Останній вид генераторів називають *автогенераторами*. Генератори із зовнішнім збудженням є, по суті, підсилювачами потужності з відповідним

частотним діапазоном, на вхід яких подаються електричні сигнали від автогенераторів.

Електронні генератори можуть працювати в кожному з режимів А, В або С, але зазвичай в них використовується режим С через можливість одержати найбільший ККД

Електронні генератори гармонічних коливань знайшли широке застосування в електроніці. Їх використовують у приладах для контролю складу і якості різних речовин, в установках для високочастотного нагрівання металів, сушіння і зварювання діелектриків, термічної обробки виробів тощо.

Електронні генератори гармонічних коливань класифікують за рядом ознак, основними з яких є частота і спосіб збудження.

Залежно від частоти генератори поділяють на:

- *низькочастотні* (0,01–100 кГц);
- *високочастотні* (0,1–100 МГц);
- *надвисокочастотні* (понад 100 МГц).

. За способом збудження розрізняють генератори із зовнішнім збудженням і з самозбудженням. Останній вид генераторів називають *автогенераторами*. Генератори із зовнішнім збудженням є, по суті, підсилювачами і потужності з відповідним частотним діапазоном, на вхід яких подаються електричні сигнали від автогенераторів.

Електронні генератори можуть працювати в кожному з режимів А, В або С, але зазвичай в них використовується режим С через можливість одержати найбільший ККД

2.4.1 Принцип отримання незатухаючих гармонічних коливань

Фізичні основ процесу генерації можна проаналізувати на звичайному контурі з високою добротністю $Q \gg 1$ (рис. 2.15).

Якщо контуру повідомити деяку енергію, зарядивши, наприклад, конденсатор C (положення ключа – 1), а потім відключити джерело і підключити конденсатор до контуру (положення ключа 2), то в контурі виникнуть вільні коливання.

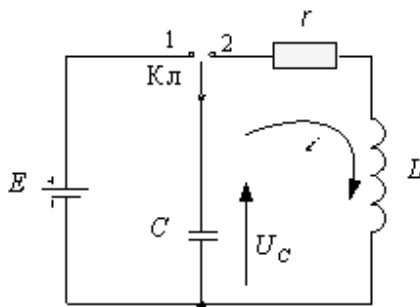


Рисунок 2.15 — Схема коливального контуру

Відомо, що вираз для контурного струму i в квазіколи-
вальному режимі (при $Q > 0,5$) має вигляд:

$$i(t) = \frac{E}{\omega_1 L} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t, \quad (2.13)$$

де $E / \omega_1 L$ – початкова амплітуда струму; $\delta = r/2L$ –
коефіцієнт загасання контуру.

$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ – частота власних коливань контуру;

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансна частота контуру.

2.4.2 RC-автогенератори

Процес виникнення коливання в автогенераторі розгля-
немо на прикладі пристрою, схема якого зображена на рис. 2.16.

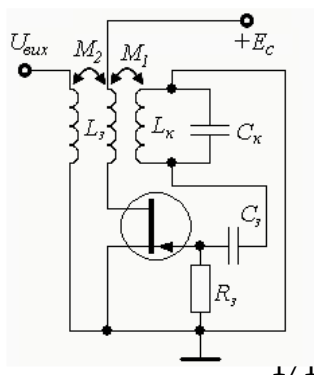


Рисунок 2.16 – Схема LC-
автогенератора

У цьому автогенераторі підсилювач зібраний на польовому транзисторі і увімкнений за схемою із спільним витоком. Колом зворотного зв'язку є котушка L_3 , увімкнена в стокове коло транзистора і індуктивно зв'язана з котушкою L_k резонансного контуру $L_k C_k$. Спочатку коливання в автогенераторі виникають або через флуктуацію струму в транзисторі, коливальному контурі або при подачі напруги живлення.

Через ці причини за умови:

$$R_{ek} \leq \rho = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}, \quad (2.14)$$

де R_{ek} – еквівалентний активний опір контуру, що визначає активні втрати; ρ – хвильовий опір контуру.

В процесі роботи з'являються слабкі коливання із частотою

$$R_{ek} \leq \rho = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}, \quad (2.15)$$

які при відсутності додатного зворотного зв'язку повинні були б припинитися через втрати енергії в контурі. Але при наявності додатного зворотного зв'язку цього не відбувається. Дійсно, напруга u_k , що з'являється на контурі підсилюється транзистором. Ці коливання через котушку L_3 , індуктивно зв'язану з котушкою L_k , знову повертаються в коливальний контур. Розмах коливань поступово наростає (рис. 1.16), що відповідає умові:

$$|\dot{K}| \cdot |\dot{\beta}| \succ 1.$$

В міру зростання амплітуди напруги в колі затвора підсилювача через нелінійність його амплітудної характеристики (ділянка ab на рис. 2.17) коефіцієнт підсилення починає зменшуватися і добуток:

$$|\dot{K}| \cdot |\dot{\beta}|$$

стає рівним одиниці.

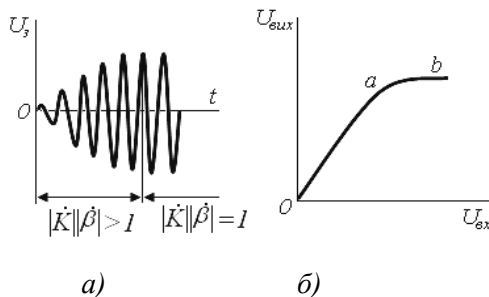


Рис. 2.17. Процес виникнення електричних коливань в автогенераторі:

a– графік вихідної напруги;
б– амплітудна характеристика

При цьому з'являються коливання з постійною і автоматично підтримуваною на необхідному рівні амплітудою, що відповідає сталому стаціонарному режиму автоколивань.

2.4.3 RC-автогенератори

На низьких і середніх частотах хорошим джерелом синусоїдальних коливань з малим рівнем спотворень служить генератор з мостом Вина (рис. 2.18). Ідея його полягає в тому, щоб створити підсилювач зі зворотним зв'язком, що має зсув фази 0° на потрібній частоті, а потім відрегулювати петльове посилення таким чином, щоб виникли автоколивання.

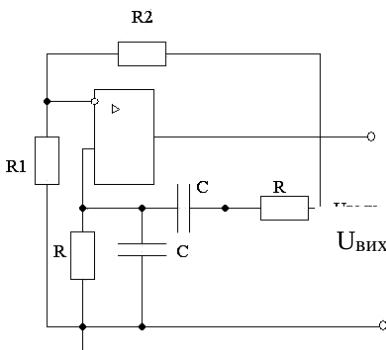


Рисунок 2.18 – RC-автогенератор з мостом Вина

Для гарантованого порушення автогенератора за будь-яких коливаннях параметрів підсилювача і ланцюги ПЗЗ, петльове посилення повинно бути дещо більшим, ніж одиниця.

Після виникнення автоколивань їх амплітуда стабілізується, в кінцевому рахунку, на такому рівні, при якому за рахунок нелінійного елемента в петлі коефіцієнт посилення знижується до одиниці.



Запитання для самоперевірки

1. Яким чином здійснюється класифікація підсилювачів електричних сигналів?
2. Які вимоги ставляться до підсилювачів сигналів?
3. Які основні режими роботи підсилювального каскаду?
4. Яке початкове положення робочої точки у режимі класу A та B ?
5. Які характерні особливості підсилювачів на польових транзисторах?
6. У яких випадках використовують багатокаскадні підсилювачі?
7. За якими критеріями класифікують операційні підсилювачі і які вони існують?
8. Де ефективно застосовуються ОП?
9. Які суттєві відзнаки між інвертуючим та неінвертуючим підсилювачами?
10. Як відрізнити інтегруючий підсилювач від диференціюючого?
11. У яких випадках використовують масштабний підсилювач?
12. Як визначити вихідну напругу суматора на базі ОП?
13. Як визначити коефіцієнт підсилювання по напрузі ОП змінного струму?
14. Що уявляють собою електронні генератори, та чому базується принцип отримання незатухаючих коливань??

Розділ 3

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

Загальні відомості

*Трансформатори. Розрахунок
трансформаторів*

Некеровані випрямлячі

Трифазні випрямлячі

Згладжувальні фільтри

Стабілізатори

Керовані випрямлячі

Інвертори

3.1. Загальні відомості

Джерело живлення – елемент електричного кола, в якому зосереджена електрорушійна сила. Джерела живлення характеризуються значенням електрорушійної сили і внутрішнього опору. До джерел живлення належать:

- гальванічні елементи;
- електрохімічні батареї;
- акумулятори;
- термопари;
- сонячні батареї;
- електричні генератори різного типу.

В залежності від електрорушійної сили джерела живлення поділяють на джерела живлення постійного струму і джерела живлення змінного струму.

Розрізняють первинні джерела живлення, які безпосередньо перетворюють інші види енергії в електричну і вторинні джерела живлення, які виконують роль проміжних перетворювачів електричної енергії, такі як блоки живлення електронних приладів, трансформатори тощо.

За способом перетворення рівня напруги блоки живлення поділяються на: трансформаторні та без трансформаторні.

За конструктивним виконанням: вбудовані та зовнішні.

За областю використання: побутові та промислові.

3.2. Випрямлячі

Випрямлячами називаються статичні пристрої, призначені для перетворення змінного струму в постійний.

Основними елементами випрямляча є:

- 1) силовий трансформатор – призначений для узгодження вхідної і випрямленої напруги;
- 2) вентильний пристрій – перетворює змінний струм в постійний.
- 3) згладжувальний фільтр – для згладжування пульсації випрямленої напруги.

Випрямлячі бувають: одно-, -двох-, трьох-, шестифазні.

Випрямлення – це перетворення змінного струму у постійний.

Випрямлячі класифікують: за рівнем використання напівперіодів змінної напруги: однонапівперіодні або двонапівперіодні; за схемою випрямлення – мостові та множенням напруги; за типом електронного вентиля – напівпровідникові діодні, тиристорні, лампові та ін; по керованості – некеровані (діодні), керовані (тиристорні).

3.2.1 Однонапівперіодний некерований випрямляч

Ефективна робота випрямляча (рис. 3.1) відбувається при живленні високоомних навантажувальних пристроїв потужність не більше 10-15 Вт.

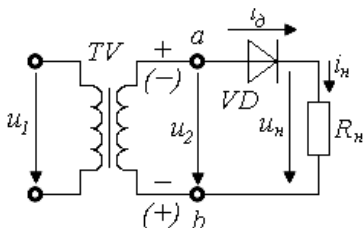


Рисунок 3.1 – Схема електрична принципова однонапівперіодного випрямляча

Основні електричні параметри випрямлячів:

$U_{н.ср.}$ – середнє значення випрямленої напруги;

$I_{н.ср.}$ – середнє значення випрямленого струму;

f_{Π} – частота пульсацій;

$U_{зв.мах}$ – зворотна напруга діода;

K_{Π} – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги.

I_{o1}, U_{o1} – діючі значення струму і напруги первинної обмотки трансформатора;

I_{o2}, U_{o2} – діючі значення струму і напруги вторинної обмотки трансформатора.

Аналізуючи часові діаграми приходимо до висновку, що:

- струм I_o в колі вторинної обмотки трансформатора і навантаженні (R_n) тече лише протягом першої половини періоду напруги U_2 . У зворотному напрямку діод VD не пропускає струм, а вся напруга U_2 прикладена у зворотному напрямку до діода:

- період випрямленої напруги дорівнює періоду напруги живлення, тому частота пульсацій випрямленої напруги дорівнює частоті мережі.

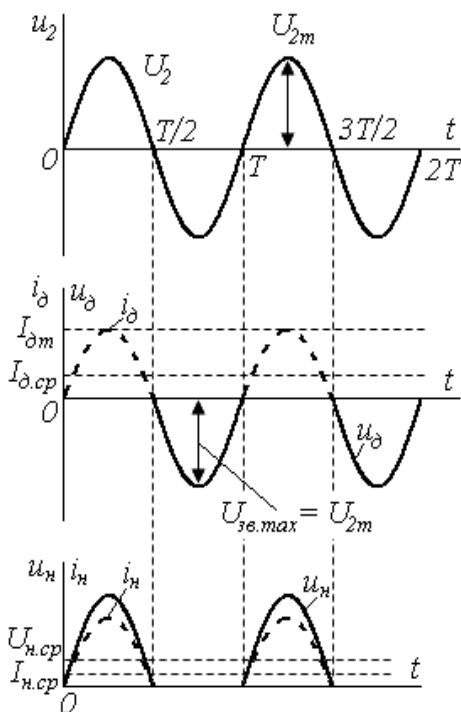


Рисунок 3.2 – Часові
діаграми
однонапівперіодного
випрямляча

Середнє значення вихідної напруги буде дорівнювати:

$$U_{н.сер} = \frac{U_{2m}}{\pi}. \quad (3.9)$$

Напруга на зворотному напрямі діода $U_{\partial 2}$:

$$U_{\partial 2} = 2,2 U_{н.сер}$$

Діюче значення струму вторинної обмотки буде дорівнювати:

$$I_{\partial 2} = \frac{\pi \cdot U_{н.сер}}{\sqrt{2} \cdot R_H} \approx 1,57 \cdot I_{н.сер}, \quad (3.10)$$

де $I_{н.сер}$ – прямий струм діода, тобто $I_{пр.сер} = I_{н.сер}$,

R_H – опір навантаження.

Типова потужності трансформатора практично дорівнює:

$$S_1 = S_2.$$

В цьому разі:

$$S_{тр} = S \approx 3,5 \cdot P_{н.сер}.$$

Враховуючи, що коефіцієнт пульсацій K_{Π} є відношенням амплітуди основної (першої) гармоніки до випрямленої напруги $U_{н.сер}$:

$$K_{\Pi} = I_{\partial 2} = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot U_{н.сер}}{U_{н.сер}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57. \quad (3.11)$$

3.2.2 Двонапівперіодні випрямлячі

Двонапівперіодні випрямлячі поділяються на мостові та з нульовим виводом у вторинній обмотці трансформатора.

Мостова схема випрямлення (рис. 3.3) складається з чотирьох вентилів $VD_1 \dots VD_4$. У додатній півперіод напруги на вторинній обмотці трансформатора струм пропускають вентиля VD_1 і VD_4 , а у від'ємний – вентиля VD_2 і VD_3 . При цьому струм у навантаженні протікає в одному напрямі, вказаному стрілкою.

Форми напруг, струму навантаження та струму в вентилях зображено на рис. 3.4.

До закритого вентиля прикладена зворотна напруга U_{∂} , яка повторює за формою напругу вторинної обмотки трансформатора TV . Максимальне значення зворотної напруги на вентилі дорівнює – амплітудному значенню напруги вторинної обмотки трансформатора.

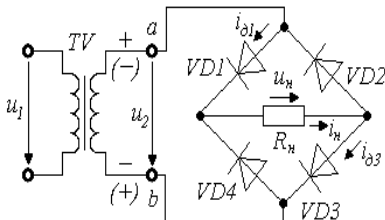


Рисунок 3.3 – Мостова схема випрямлення

Аналіз часових діаграм дозволяє одержати вирази для середніх значень випрямлених напруги і струму. Середнє значення випрямленої напруги визначається за формулою:

$$U_{н.ср} = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} \approx 0,9 \cdot U_{\partial 2}, \quad (3.12)$$

а середнє значення струму:

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx 0,9 \frac{U_{\partial 2}}{R_n}. \quad (3.13)$$

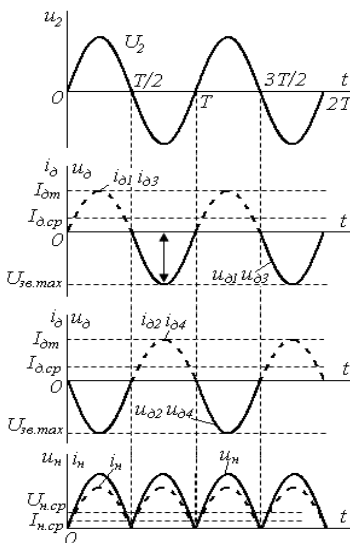


Рисунок. 3.4 – Часові діаграми мостової схеми випрямлення

Діюче значення вторинної обмотки трансформатора:

$$U_{\partial 2} = \frac{\pi \cdot U_{н.сер}}{2\sqrt{2}} \approx 1,11 \cdot U_{н.сер}, \quad (3.13)$$

а середній струм кожного діода, що є також струмом вторинної обмотки трансформатора.

Максимальний прямий струм діода:

$$I_{пр.м} = \frac{U_{2m}}{R_n} \approx 1,57 I_{н.сер}. \quad (3.14)$$

коефіцієнт пульсації, при $f_g = f_m$ дорівнює $K_{\Pi} = 0,67$.

Двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом у вторинній обмотці трансформатора (рис. 3.5) можна розглядати як з'єднання двох однонапівперіодних випрямлячів, увімкнених на один навантажувальний резистор R_n .

Випрямляч застосовують для живлення навантажувальних пристроїв малої і середньої потужностей. Співвідношення для струмів і напруг визначаються за формулами отриманими для мостового випрямляча, а коефіцієнт пульсації $K_{\Pi} = 0,67$.

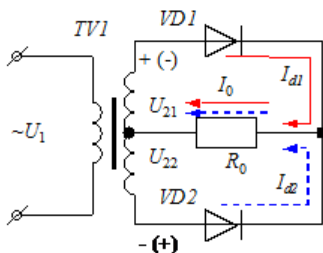


Рисунок 3.5 – Двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом у вторинній обмотці трансформатора

3.2.3 Трифазні випрямлячі

Для живлення навантажень середньої і великої потужності використовують трифазні випрямні схеми, які мають порівняно з однофазними ряд переваг:

- краще використовуються вентилі за струмом;
- суттєво нижчий коефіцієнт пульсацій;
- ефективне використання габаритної потужності трансформатора;
- більш ефективне використання згладжуючих фільтрів.

Існують два типи схем трифазних випрямлячів: однопівперіодна – схема Міткевича; двопівперіодна мостова – схема Ларіонова.

Схема Міткевича. Однопівперіодна схема з нульовим виводом зображена на рис. 3.6. Ця схема складається із трифазного трансформатора TV, випрямних діодів $VD_1...VD_3$ та навантаження R_n , яке вмикається між спільним виводом вторинних обмоток трансформатора (нульовим виводом) та спільною точкою з'єднання випрямних діодів. Фактично ця схема являє собою три однофазних однопівперіодних випрямляча, увімкнених паралельно. Тому первинні обмотки трансформатора можуть з'єднуватися як зіркою, а вторинні – лише зіркою. Випрямні діоди працюють по черзі. За період напруги живлення кожен діод знаходиться у провідному стані третину періоду, причому проводить той діод, до анода якого на даний момент прикладена найбільш позитивна фазна напруга. Частота пульсації випрямленої напруги в три рази перевищує частоту мережі.

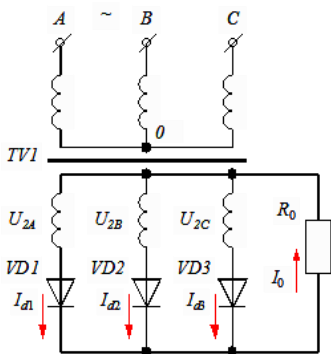


Рисунок 3.6 – Однопівперіодна схема з нульовим виводом

Максимальна зворотна напруга на діоді дорівнює амплітуді лінійної напруги, тобто:

$$U_{зм} \approx 2,09U_0. \quad (3.15)$$

Постійна складова випрямленої напруги:

$$U_0 = 1,17U_2. \quad (3.16)$$

Максимальний струм діода:

$$I_{\partial.м} \approx 1,2I_0. \quad (3.17)$$

Коефіцієнт пульсації – $K_n = 0,25$.

Типова потужність трансформатора повинна бути у 1,35 рази вищою потужності, яка виділяється на навантаженні:

Схема Ларіонова. Трифазна мостова схема випрямляча зображена на рис. 3.7. У цій схемі і первинна, і вторинна обмотки вмикатися за схемою «зірка/зірка». Шість випрямних діодів увімкнені у трифазну мостову схему і утворюють дві групи: анодну – VD_1, VD_2, VD_3 та катодну – VD_4, VD_5, VD_6 .

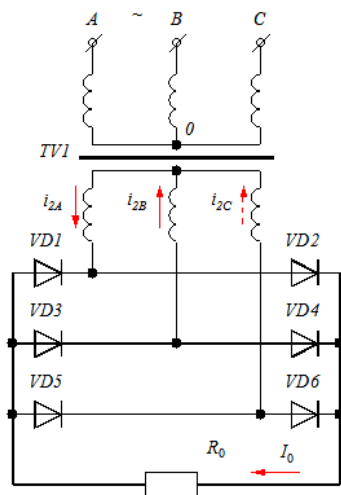


Рисунок 3.7 – Трифазна мостова схема Ларіонова

Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів. Усі діоди працюють попарно: один з анодної групи й один з катодної. У катодній групі струм проводить той діод, анодна напруга на якому більша, а в анодній – той, котрий має найбільш негативний потенціал на катоді. На рис. 2.9. наведено форми струмів та напруг в різних точках цієї схеми.

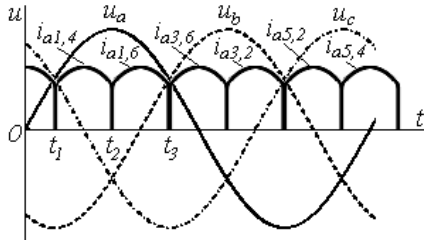


Рисунок 3.8 – Часові діаграми трифазної схеми Ларіонова

Пульсації випрямленої напруги значно менші, ніж у трифазному випрямлячі з нейтральним виводом і становить 0,057.

Постійна складова випрямленої напруги у два рази більше, ніж у випрямлячі з нейтральним виводом:

$$U_0 = 2,34U_2. \quad (3.18)$$

Максимальна зворотна напруга дорівнює амплітудному значенню лінійної напруги. Діоди в даному випрямлячі можна вибирати за зворотною напругою, близькою до $U_{н.ср.}$. ККД випрямляча Ларіонова більший за ККД випрямляча з нейтральним виводом, оскільки в мостовому випрямлячі немає підмагнічування осердя трансформатора постійним струмом.

3.3 Згладжувальні фільтри

Для значного зменшення змінної складової випрямленої напруги використовують згладжувальні фільтри. Вони складаються з дроселя і конденсатора або з резистора і конденсатора, також використовуються фільтри на транзит-торах.

Параметром якості фільтра є коефіцієнт згладжування, який дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході до коефіцієнта пульсацій на виході.

Залежно від призначення того або іншого електронного блоку та його місця в електронному пристрої або системі (на вході, виході тощо) коефіцієнт пульсації напруги живлення не повинен перевищувати певних значень:

- основних каскадів автоматичних систем він не повинен перевищувати 10^{-2} - 10^{-3} ;
- вихідних підсилювальних каскадів – 10^{-4} - 10^{-5} ;
- автогенераторів – 10^{-5} - 10^{-6} ;
- вхідних каскадів електронно-вимірювальних пристроїв – 10^{-6} - 10^{-7} .

Ємнісний фільтр – це конденсатор, що вмикається паралельно навантаженню. За умови, що опір конденсатора для складової пульсуючого струму з найнижчою частотою значно менший опору навантаження, забезпечується шунтування навантаження за змінним струмом.

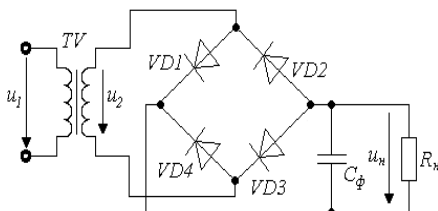


Рисунок 3.9. –Схема ємнісного фільтра

Основним елементом фільтра згладжування є конденсатор. Для постійного струму опір конденсатора дорівнює нескінченності, а для змінної складової незначний. Основним параметром, що характеризує ефективність дії згладжувального фільтра є *коефіцієнт згладжування*, який дорівнює відношенню коефіцієнтів пульсацій на вході і виході фільтра. Принцип дії ємнісного фільтра зручно розглядати за допомогою часових діаграм, зображених на рис. 3.10. В інтервал часу t_1 - t_2 через відкритий діод VD заряджається конденсатор до амплітудного значення напруги U_{2m} . У цей час струм $i_a = i_c + i_n$. В інтервалі часу t_2 - t_3 конденсатор розряджається на резистор R_n , заповнюючи розрядним струмом паузу в навантажувальному

струмі i_n , (пауза є в однонапівперіодному випрямлячі під час відсутності фільтра).

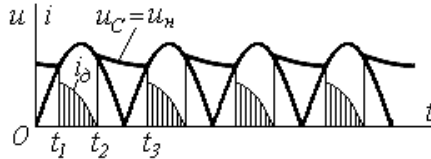


Рисунок 3.10 – Часові діаграми роботи ємнісного фільтра

У цей інтервал часу напруга на резисторі R_n знижується до деякого значення, що відповідає часу t_3 . Після цього діод знову відкривається, конденсатор C_ϕ починає заряджатися і процеси заряду та розряду конденсатора повторюються.

Значення коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги залежить від ємності конденсатора C_ϕ або опору навантажувального резистора R_n . При цьому чим менше розрядяться конденсатор, тим менші будуть пульсації у випрямленому струмі i_n . Розряд конденсатора C_ϕ визначається постійною часу розряду, який повинен бути більший періоду частоти пульсацій не менше чим у 10 разів. Коефіцієнт пульсації напруги визначається за формулою:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн.}} \cdot \tau_{\text{розр.}}}, \quad (3.19)$$

де $\tau_{\text{розр.}} = C_\phi \cdot R_n$; $f_{\text{осн.}}$ – частота основної (першої) гармоніки.

Ємнісний фільтр доцільно застосовувати при потужності P_n не більше декількох десятків ватів.

Індуктивний фільтр (рис. 3.11) – це дросель, що вмикається послідовно з навантаженням. Фактично з навантаженням він являє собою частотно-залежний дільник напруги.

Він ефективний в разі, коли опір дроселя ωL змінній складовій пульсуючого струму з найнижчою частотою значно

перевищує активний опір навантаження. Тоді вся постійна складова випрямленої напруги прикладається до активного опору навантаження, а змінна складова падає на дроселі.

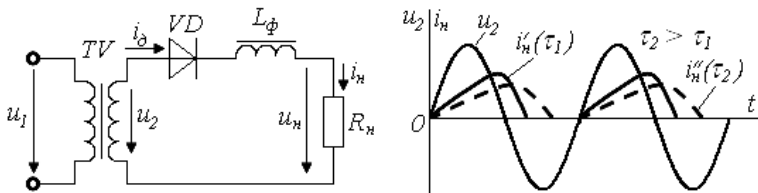


Рисунок 3.11 – Індуктивний фільтр в однонапівперіодній схемі (а) та її часові діаграми

Коефіцієнт пульсацій визначається за формулою:

$$K_{\Pi} = \frac{2\pi \cdot L_{\phi}}{R_n} \cdot f_{осн}. \quad (3.20)$$

LC- та RC- фільтри. До LC- та RC- фільтрів відносяться Γ (одноланкові) та Π -подібні (багатоланкові) фільтри. Γ -подібні LC- фільтри (рис. 3.12) є найпростішими багатоланковими фільтрами. Їх застосовують тоді, коли за допомогою одноланкових фільтрів не вдається досягти необхідного коефіцієнта згладжування. Ці фільтри, що є більш складними в порівнянні з одноланковими, забезпечують значне зменшення коефіцієнта пульсацій. Зниження пульсацій LC-фільтром пояснюється спільними діями дроселя та конденсатора.

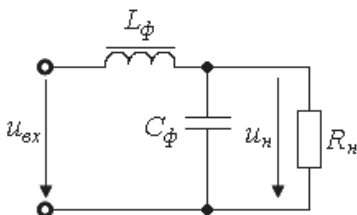


Рис. 3.12. LC- фільтр

Зниження змінних складових випрямленої напруги обумовлено як згладжувальною дією конденсатора C_{ϕ} , так і значним падінням змінних складових напруги на дроселі L_{ϕ} .

З врахуванням рекомендацій до вибору значень C_ϕ і L_ϕ , викладених раніше, вираз для коефіцієнта згладжування LC -фільтра можна записати у вигляді:

$$K_3 = \omega_{(1)}^2 \cdot L_\phi \cdot C_\phi - 1. \quad (3.21)$$

Коефіцієнта згладжування дозволяє розрахувати параметри фільтра за наступною формулою:

$$LC = \frac{K+1}{\omega_{(1)}}, \quad (3.22)$$

де $\omega_{(1)}$ – частота першої гармоніки.

При необхідності отримання $K_3 \geq 100$ використовують Π -подібні фільтри. Π -подібний фільтри відноситься до багатоланкових фільтрів, оскільки складається з ємнісного фільтра ($C_{\phi 1}$) і Γ -подібного LC -фільтра ($L_\phi C_{\phi 2}$) або RC -фільтра ($R_\phi C_{\phi 2}$) (рис. 3.13, а, б).

Коефіцієнт згладжування багатоланкових фільтрів дорівнює (при дотриманні певних умов) добутку коефіцієнтів простих ланок (фільтрів).

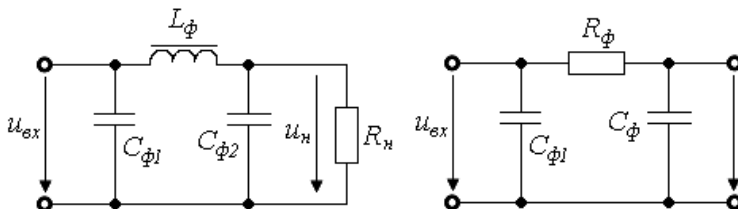


Рисунок 3.13 – Π -подібні фільтрувальні кола:
а – LC ; б – RC

Електронні фільтри. Зменшити масогабаритні показники згладжують фільтрів можна, використовуючи замість громіздких фільтруючих дроселів і конденсаторів транзисторні фільтри. живильної мережі 50 Гц. Проте, маючи вигравш перед LC -фільтрами за вказаними показниками (в 2-9 разів),

транзисторні згладжуючі фільтри поступають їм в коефіцієнті корисної дії (ККД).

Якщо на дроселі індуктивно-ємнісного фільтра падає напруга 1-2 В, то в транзисторних фільтрах на регулюючому транзисторі – до 3 -5 В.

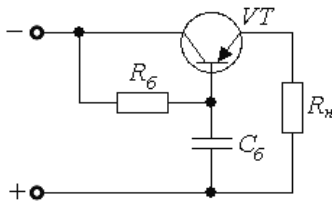


Рисунок 3.14 – Схема транзисторного фільтра

Принцип його роботи полягає в наступному. На колектор транзистора надходить напруга з великою амплітудою пульсації, а ланцюг бази живиться через інтегруючий ланцюг R_1C_1 , який згладжує пульсації напруги на базі транзистора.

Опір резистора R_1 вибирають з умови достатності струму бази для забезпечення заданого струму в навантаженні. Чим більше стала часу $\tau = R_1C_1$, тим менше пульсації напруги на базі. Оскільки пристрій являє собою емітерний повторювач, то на виході фільтра пульсації будуть настільки ж малими, як і на базі. Ємність конденсатора C_1 може бути в кілька разів менше, ніж у конденсатора в LC-фільтрі, так як базовий струм набагато менше вихідного струму фільтра (колекторного струму транзистора) – приблизно в h_{21e} разів.

3.4 Стабілізатори

Стабілізатори напруги – електронні пристрої, призначені для підтримання сталого значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору навантаження (дестабілізуючі чинники). За принципом роботи стабілізатори напруги поділяються на параметричні та компенсаційні.

Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елемента стабілізатора, залежно від зміни дестабілізуючого чинника.

У компенсаційному методі стабілізації у вимірювальному елементі порівнюється величина, що стабілізується, з еталонною і виробляється сигнал розгалуження.

3.4.1 Параметричний стабілізатор напруги

Електрична принципова схема параметричного стабілізатора, на кремнієвому стабілітроні наведена на рис. 3.15. і складається з кремнієвого стабілітрона баластного резистора R_B .

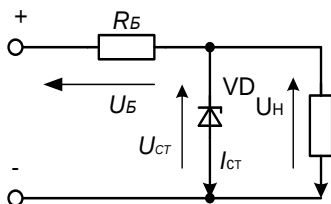


Рисунок 3.15— Схема параметричного стабілізатора напруги

Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд:

$$U_{вх} = U_n + U_{RB},$$

де $U_{вх}$ – напруга на вході стабілізатора після ємнісного фільтра; R_B – баластний опір, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу навантаження; U_n – вихідна напруга стабілізатора.

Опір баластного резистора R_B вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела $U_{вх}$, напруга і струм стабілітрона теж дорівнювали номінальним значенням $U_{ст/н}$, та $I_{стн}$. Величину $I_{стн}$ визначають за паспортними даними та виразом

$$I_{ст/н} = (I_{стн.мін} + I_{ст.макс})/2.$$

з рівняння електричної рівноваги, визначаємо баластний опір за виразом

$$R_B = \frac{U_{ex} - U_{cm.m}}{I_{cm.m} + I_n}, \quad (3.23)$$

де $I_n = P_n/U_n$; $U_n = U_d$; $I_{ex} = I_{cm.n} + I_n$.

Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex} / U_{ex}}{\Delta U_{вих} / U_{вих}}, \quad (3.24)$$

який для параметричних стабілізаторів становить $K_{cm.u} = 20 \dots 30$.

3.5.2 Компенсаційні стабілізатори напруги

Робота компенсаційних (транзисторних) стабілізаторів напруги базується на порівнянні вихідної напруги стабілізатора з еталонною. Якщо вони не рівні між собою, то різниця цих напруг підсилюється й подається на регулювальний елемент, який відновлює вихідну напругу до стабілізованої величини.

Такі стабілізатори дозволяють розширити діапазон стабілізованих напруг та забезпечити вищу якість стабілізації ($K_{cm.u} \geq 50$). Транзистор VT1 (рис. 3.16) виконує функцію регулювального елемента, а ОП (DA) – функцію підсилювального елемента. Еталонна напруга задається з допомогою стабілітрона VD.

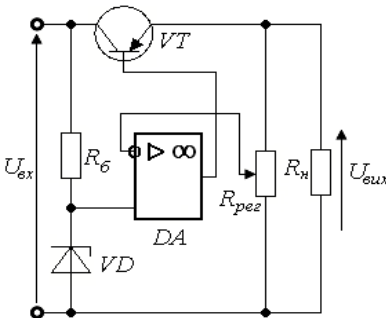


Рисунок 3.16 – Схема принципова електрична компенсаційного стабілізатора напруги

Вона порівнюється з напругою на резисторі R_{pez} , яка пропорційна вихідній напрузі стабілізатора, тому що цей резистор є дільником вихідної напруги. Різниця цих напруг

підсилюється DA і надходить на базу транзистор VT_1 , та зумовлює зміну напруги емітер-колектор VT_1 , завдяки чому забезпечується стабілізація вихідної напруги (підтримується незмінною напруга на виході стабілізатора). Напруга на виході стабілізатора (U_n) дорівнює:

$$U_n = U_{ex} - I_n \cdot R_{PE} = const, \quad (3.25)$$

де U_{ex} – напруга на вході стабілізатора; I_n – струм навантаження;
 R_{PE} – опір регулюючого елемента (опір κ -е транзистора VT_1).

3.4.3 Мікросхемні (інтегральні) стабілізатори напруги

В останні роки широке поширення одержали інтегральні стабілізатори напруги. Джерела живлення на їх основі відрізняються малим числом додаткових деталей, невисокою вартістю і хорошими технічними характеристиками. З'явилася можливість забезпечити кожен плату складного пристрою власним стабілізатором напруги (СН), а значить, будуть використані для його живлення загальний нестабілізований джерело. Промисловість випускає широкий асортимент мікросхем серій 142, К142 і КР142. До їх складу входять стабілізатори:

- з фіксованою вихідною напругою (142ЕН5, 142ЕН8, 142ЕН9, К142ЕН8, К142ЕН9, КР142ЕН5, КР142ЕН8, КР142ЕН9; далі в тексті – 142ЕН5, 142ЕН8, 142ЕН9),
- з регулюючим елементом (КР142ЕН12А тощо).

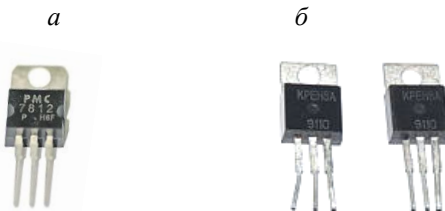


Рисунок 3.17 – Мікросхемні стабілізатори напруги:

а – мікросхема МС7812, б – К142ЕН8Б.

Схема включення стабілізатора напруги на базі мікросхеми з фіксованою вихідною напругою К142ЕН8Б.

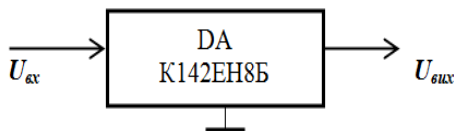


Рисунок 3.18 – Інтегральний стабілізатор напруги

Конструкція мікросхеми серії дозволяє (рис. 3.18,б) встановлювати їх на тепловідвідний радіатор, завдяки чому збільшується максимально допустима потужність, що розсіюється стабілізатором. Аналог всесвітньо відомого інтегрального ІСН – LM 317Т.

3.5 Імпульсні стабілізатори напруги

Імпульсний стабілізатор, в порівнянні з лінійним, володіє значно більш високим ККД. Недоліком імпульсного стабілізатора є наявність імпульсних перешкод у вихідній напрузі.

На відміну від лінійного стабілізатора, імпульсний стабілізатор може перетворювати вхідну напругу довільним чином (залежить від схеми стабілізатора):

- понижуючий стабілізатор: вихідна стабілізована напруга завжди нижче вхідної і має ту ж полярність;
- підвищувальний стабілізатор: вихідна стабілізована напруга завжди вище вхідної і має ту ж полярність;
- інвертуючий стабілізатор: вихідна стабілізована напругу має зворотну полярність щодо вхідного, абсолютне значення вихідної напруги може бути будь-яким.

3.6.1 Ключовий імпульсний стабілізатор

На рис. 3.19. зображена схема ключового стабілізатора напруги з тригером Шмітта. У ньому, при замкнутому ключі (1), вхідна напруга надходить через ключовий елемент на накопичувач (2), а вихідна напруга порівнюється з мінімально допустимою напругою і максимально допустимою напругою в компараторе (4), який є вхідний складовою частиною інвертуючого тригера Шмітта (3).

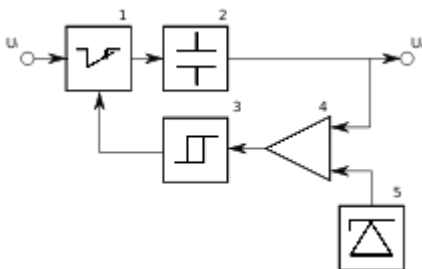


Рисунок 3.19 –
Функціональна схема
ключового
стабілізатора напруги

Такий стабілізатор простий по конструкції, частота зами-
кання/розмикання ключа в ньому визначається сумою постійних
часу заряду і розряду накопичувача (об'єкта управління) і
різницею між максимально допустимим і мінімально
допустимим напруженнями і, при постійному навантаженні,
постійна.

3.5.2 Ключовий стабілізатор з ШІМ

На рис. 3.20. зображена схема ключового стабілізатора
напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Коли ключ
(1) замкнутий, вхідна напруга U_{ex} і через ключ надходить на
інтегратор (2).

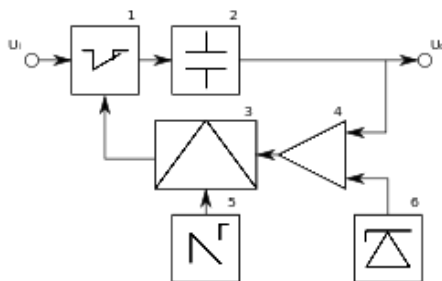


Рисунок 3.20 – Функціональна схема ключового
стабілізатора напруги з ШІМ

Інтегратор накопичує енергію, що подається з ключа і
віддає її в навантаження, коли ключ розімкнута. У результаті на
виході маємо усереднене значення напруги, яка залежить від

вхідної напруги і шпаруватості імпульсів, що залежить від частоти генератора і ємності конденсатора.

Підсилювач на ОП (4) зрівнює вихідну напругу з еталонною напругою (6) і підсилює їх різницю. Посилена різниця надходить на модулятор (3). У модуляторі компаратор перетворює імпульси генератора (5) в прямокутні імпульси, відхилення шпаруватості яких від середнього значення, рівного 2, пропорційно різниці між вихідною напругою і напругою порівняння. Відхиленнях вихідної напруги від напруги порівняння працює як пропорційний регулятор (ПІ- регулятор). Зазвичай генератор видає трикутні або пілкоподібні імпульси, які перетворюються в прямокутні за допомогою порогового елемента з регульованим порогом спрацьовування (компаратора).

Прямокутні імпульси з виходу модулятора управляють замиканням і розмиканням ключа (1). Тому, ключовою стабілізатор напруги з ШІМ, при малих На рис. 3.21. зображена схема сучасного імпульсного стабілізатора напруги з використанням ШІМ- модулятора КР1114ЕУ4. Максимальна вхідна напруга стабілізатора – 30В, вона обмежене гранично допустимою напругою стік-витік p -канального польового транзистора VT_1 (RFP60P03). Резистор R_3 і конденсатор C_5 задають частоту генератора пілкоподібної напруги. З джерела опорного напруги (виведення 14) D_1 через резистивний дільник R_6 - R_7 на інвертуючий вхід першого підсилювача похибки (виведення 2) подається частина зразкового напруги.

Сигнал зворотного зв'язку через дільник R_8, R_9 подається на неінвертуючий вхід першого підсилювача похибки (виведення1) мікросхеми. Вихідна напруга регулюється резистором R_7 . У стабілізаторі вихідний формувач мікросхеми включений в однотактному режимі. Для цього виведення 13 включений на загальний провід.

Вихідний каскад мікросхеми через резистивний дільник R_1, R_2 керує регулюючим елементом стабілізатора – польовим транзистором VT_1 . Як видно зі схеми, при застосуванні КР1114ЕУ4 вимагається порівняльне невелике число зовнішніх елементів.

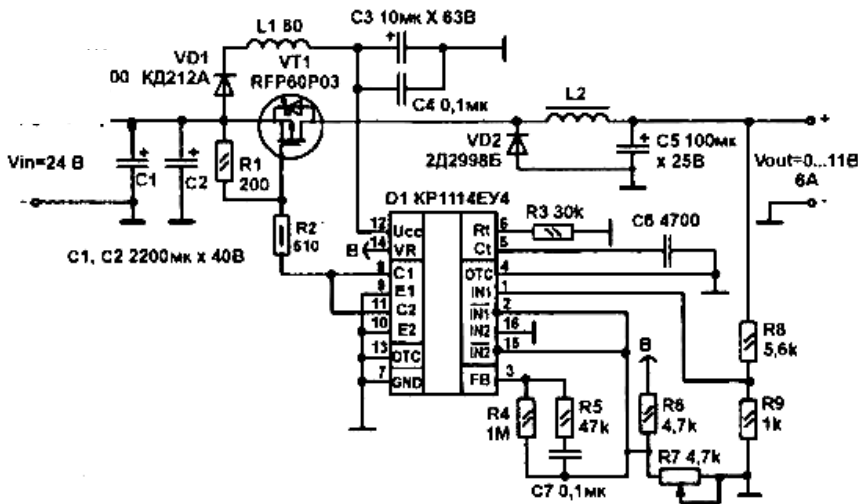


Рисунок 3.21 – Імпульсний стабілізатора напруги

Зменшити комутаційні втрати і підвищити ККД стабілізатора вдалося завдяки використанню діода Шоттки VD_2 ($U_{np} = 0,54$ В, $U_{36} = 30$ В, $f_{max} = 200$ кГц).

Для захисту стабілізатора від перевантаження по струму застосований самовідновлюється запобіжник FU_1 MF-R400. Стабілізатор має максимальний ККД (близько 90%) – на частоті 12 кГц.

3.6 Керовані випрямлячі

В наш час системи перетворення змінної синусоїдальної напруги і струму в постійну практично повністю представлені напівпровідниковими випрямлячами. Дуже часто необхідно регулювати величину отриманої постійної напруги.

На рис 3.22. зображена принципова схема симетричного керованого випрямляча і тимчасові діаграми струмів і напруг. Економічно та вигідно поставити випрямляч з імпульсно-фазовим керуванням – через її відносну дешевизну та високий

ККД. У момент часу $(0 + a_1)$ на управляючий елемент тиристорів подається імпульс управління – тиристори відкриваються і напруга U_2 передається в навантаження. При запиранні тиристорів $(\pi + a_2)$ $VS_1 \dots VS_4$ в навантаженні напруга дорівнює нулю. Діапазон регулювання в керованих випрямлячах визначається наступними параметрами:

- нестабільністю вхідної напруги U_1 ;
- діапазоном струму навантаження ($I_{0\min}$, $I_{0\max}$);
- характером навантаження (активна, активно-індуктивне навантаження);
- температурною залежністю параметрів напівпровідників.

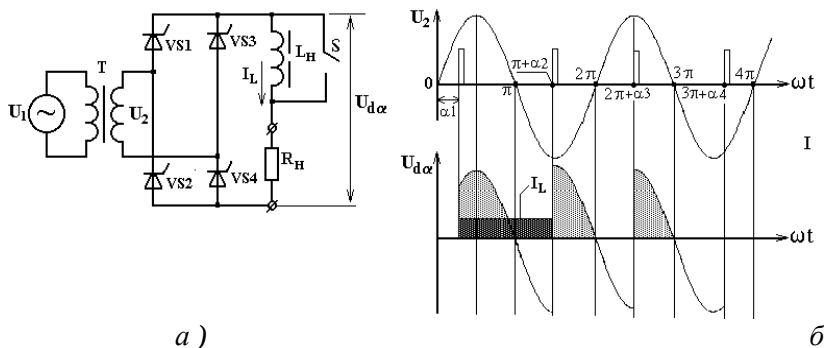


Рисунок 3.22– Принципова електрична схема симетричного керованого випрямляча (а) і тимчасові діаграми струмів та напруг (б).

3.7. Інвертори

Інвертор (англ. inverter, нім. Inverter m, Negator m, Inverter m, Wechselrichter m, Umkehrröhre f) – перетворювач постійного струму в змінний однофазний або багатofазний струм, силовий генератор змінного струму. Інвертор значно дешевший за міні-електростанцію, мініатюрний і легкий.

Спільно з одним, або декількома акумуляторами він може працювати як автономне джерело безперебійного живлення для будинку, котельної, пожежних і охоронних систем.

На рис. 3.23. зображена схема однотактного транзисторного інвертора напруги. При подачі керуючого сигналу ($U_{упр}$) на базу транзистора VT_1 в первинному ланцюзі трансформатора з'являється струм. Контур його протікання: "+" $U_{вх.}$, обмотка трансформатора в первинному ланцюзі; колектор-емітер VT_1 ; "-" U_1 .

На інтервалі імпульсу відбувається передача енергії в навантаження через випрямний діод VD_1 і накопичення реактивної енергії в дроселі фільтра, що згладжує – L .

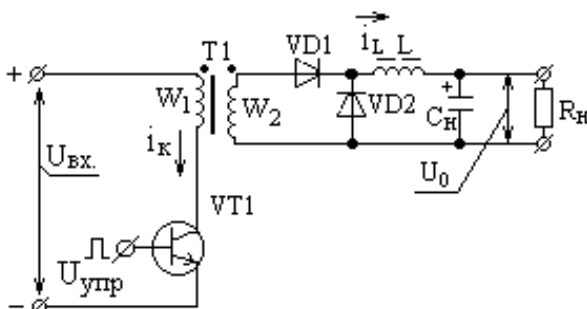


Рисунок 3.23 – Схема однотактного інвертора напруги

На рис. 3.24. зображена схема простого двотактного транзисторного інвертора напруги. Задаючий генератор виконаний на мікросхемі А1 (KP1211EY1).

Ланцюг R_1, C_1 визначає частоту генерації, R_2, C_2 потрібні для надійного запуску генератора.

Живлення мікросхеми здійснюється від стабілізатора на елементах R_3, VD_1, C_3 (напруга стабілізації 8-10 В). На виході – двотактний каскад: два польові транзистори IRL2505.

Трансформатор – мережевий, що має дві обмотки по 12 В необхідної потужності, краще тороїдальний. Конденсатор C_6 згладжує імпульси.

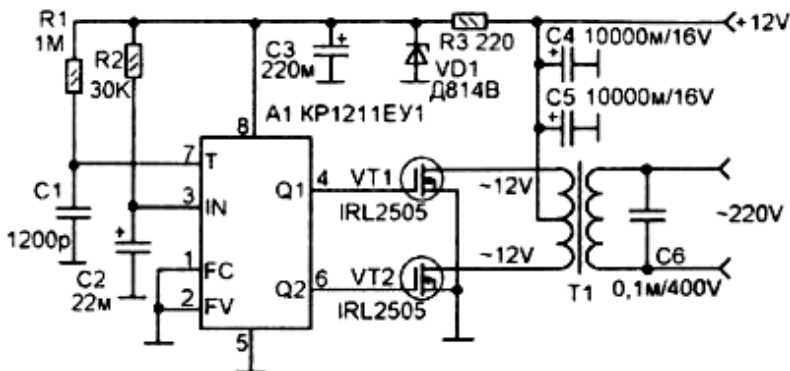


Рисунок 3.24 – Двотактний транзисторний інвертор напруги



Запитання для самоперевірки

1. За яким принципом поділяються джерела живлення?
2. За яким алгоритмом здійснюють розрахунок силових трансформаторів для випрямлячів?
3. Що уявляє собою випрямляч які його основні елементи?
4. Які основні схемотехнічні рішення некерованих випрямлячів?
5. Які переваги мають трифазні випрямні схеми порівняно з однофазними?
6. Які існують схеми трифазних випрямлячів та які їх переваги та недоліки?
7. Яке призначення згладжувальних фільтрів та які існують їх види?
8. На чому базується робота компенсаційних стабілізаторів?
9. Імпульсний стабілізатор – це...
10. Яка доцільність використання інверторних перетворювачів напруги?

Розділ 4

ЦИФРОВА ЕЛЕКТРОНІКА

Практично до недавнього часу для створення цифрових пристроїв (ЦП) широко застосовувались дискретні елементи – електромагнітні, електронні тощо. Однак подальше вдосконалення ЦП із застосуванням лише дискретних елементів вимагало ускладнення структури, збільшення кількості ланок і корегуючих ланцюгів, що в свою чергу призводило до зниження надійності. Перехід на інтегральну технологію значно покращило технічний та експлуатаційний рівень ЦП. Майже всі сучасні пристрої інформаційної електроніки створюються на базі інтегральних мікросхем.

Загальні відомості та визначення

Транзисторний ключ

Логічні елементи

*Двійкові логічні операції з
цифровими сигналами*

4.1 Загальні відомості про інтегральні мікросхеми

Інтегральна мікросхема (ІМС) – мікроелектронний виріб, що виконує визначену функцію перетворення, обробки сигналу і (або) накопичування інформації і має високу щільність упакування електрично з'єднаних елементів (або елементів і компонентів) і (або) кристалів, що з точки зору вимог до випробувань, приймання, постачання й експлуатації розглядається як єдине ціле.

Елемент ІМС – частина ІМС, що виконує функцію якогось електрорадіоелемента, що виготовлена невід'ємно від кристала або підложки і не може бути виділена як самостійний виріб щодо вимог до випробувань, приймання, постачання й експлуатації (під електрорадіоелементом розуміють транзистор, діод, резистор, конденсатор і ін.).

Компонент ІМС – частина ІМС, що виконує функції якогось електрорадіоеlementу, яку можна розглядати як само-

стійний виріб щодо вимог до випробувань, приймання, постачання й експлуатації.

Корпус ІМС – частина конструкцій ІМС, призначена для захисту ІМС від зовнішніх впливів і для з'єднання з зовнішніми електричними ланцюгами за допомогою виводів.

Ступінь інтеграції ІМС – показник ступеня складності ІМС, що характеризується числом елементів, які містяться в ній, і компонентів. ІМС першого ступеня інтеграції містить до 10 елементів і компонентів включно, ІМС другого ступеня інтеграції – від 11 до 100 і т.д.

Серія ІМС – сукупність типів ІМС, що можуть виконувати різні функції, мають єдине конструктивно-технологічне виконання і призначені для спільного застосування.

4.1.1 Класифікація ІМС

Залежно від технології виготовлення інтегральні мікросхеми діляться на напівпровідникові, плівкові та гібридні.

Напівпровідникова – ІМС, у якій – всі елементи і міжелементні з'єднання виконані в середині та на поверхні напівпровідника.

Плівкова – ІМС, у якій – всі елементи і міжелементні з'єднання якої виконані тільки у вигляді плівок. Варіантами технічного виконання плівкових інтегральних схем є тонкі товстоплінкові ІМС. До тонкоплінкових умовно відносять ІМС із товщиною плівок до 1 мкм, а до товстоплінкових ІС із товщиною плівок понад 1 мкм.

Залежно від функціонального призначення інтегральні схеми діляться на дві основні групи:

1. Аналогові. До аналогових відносять ІС, призначені для перетворення й обробки сигналів, що змінюються за законом безупинної функції.

2. Цифрові. До цифрових відносяться ІС, за допомогою яких перетворюються й оброблюються сигнали, виражені в двоїчному або іншому цифровому коді.

Аналогові та цифрові ІС випускаються у вигляді серій, які містять сукупність ІС, що виконують різні функції, але мають єдине конструктивно-технологічне виконання і призначені для спільного застосування.

Інтегральні схеми однієї серії, як правило, мають єдині напруги джерел живлення, які погоджені за вхідними і вихідними опорами, рівнями сигналів.

Ступінь інтеграції ІМС – показник ступеня складності ІМС, що характеризується числом елементів, які містяться в ній, і компонентів.

- МІС – мала інтегральна схема до 100 елементів у кристалі;

- СІС – середня інтегральна схема до 1 000;

- ВІС – велика інтегральна схема до 10 000;

- ЗВІС – зверхвелика інтегральна схема до 1 мільйона;

- УВІС – ультравелика інтегральна схема до 1 мільярда;

- ГВІС – гігавеликі більш 1 мільярда.

В даний час назва ГВІС практично не використовується.

Одним з найважливіших шляхів вдосконалення обчислювальної техніки є широке застосування в ній досягнень сучасної мікроелектроніки. Успіхи напівпровідникової інтегральної електроніки привели до створення нового класу складних функціональних електронних виробів – великих інтегральних схем (ВІМ), які стали основною елементною базою ЕОМ четвертого покоління.

Доброю альтернативою рекомендованим ВІС з'явилися мікропроцесорні набори – сукупність великих інтегральних схем, що реалізують складні функції цифрової апаратури. З цих «цеглин» досить просто будуються мікрокомп'ютери (мікро-ЕОМ), що отримали виключне розвиток і знайшли широке застосування в різноманітних системах управління.

4.1.2 Функціональні напрямки ІМС. Основні параметри

Інтегральна мікросхема може володіти закінченим, як заведено складним, функціоналом – аж до цілого мікрокомп'ютера.

Аналогові схеми: операційні підсилювачі; генератори сигналів; фільтри; перетворювачі сигналів; різні датчики тощо.

Цифрові схеми. логічні елементи; тригери; лічильники; регістри; модулі пам'яті; шифратори; дешифратори; мікроконтролери; (мікро) процесори (в тому числі ЦПУ в комп'ютері);

однокристальний в мікрокомп'ютері; ПЛІС – програмовані логічні інтегральні схеми.

До основних параметрів ІМ відносяться:

- *максимальна вхідна напруга* – найбільша вхідна напруга інтегральної мікросхеми, при якій вихідна напруга відповідає заданій;

- *номінальна вхідна напруга* – найменша вхідна напруга інтегральної мікросхеми, при якій вихідна напруга відповідає заданій;

- *чутливість* – найменша вхідна напруга, при якій електричні параметри інтегральної мікросхеми відповідають заданим;

- *діапазон вхідних напруг* – інтервал напруг від мінімальної вхідної напруги до максимальної;

- *струм споживання струм*, який споживається інтегральною мікросхемою від джерел живлення в заданому режимі;

- *струм холостого ходу* струм, який споживається інтегральною мікросхемою при відключеному навантаженні;

- *споживана потужність P* – потужність, яка споживається інтегральною мікросхемою від джерел живлення, що працює в заданому режимі;

- *вхідний опір* – відношення збільшення вхідної напруги інтегральної мікросхеми до збільшення активної складової вхідного струму при заданій частоті сигналу.

- *вихідний опір* – відношення збільшення вихідної напруги інтегральної мікросхеми до активної складової вихідного постійного або синусоїдального струму, що його викликала, при заданій частоті сигналу.

4.2.4 Застосування інтегральних мікросхем

Інтегральні мікросхеми застосовуються у всіх областях сучасної техніки де використовують напівпровідникові прилади. Малі габарити і маси, велика надійність, висока стабільність і відтворюваність параметрів, низький рівень власних шумів, мале споживання енергії дозволяють ІМС успішно конкурувати з схемами, зібраними на дискретних елементах.

Особливо велике значення інтегральних мікросхем для подальшого розвитку обчислювальної техніки, автоматики,

телевизійної техніки, систем управління технологічними процесами в промисловості і сільському господарстві, дрого, радіо- і телевізійного зв'язку, всіх видів транспорту.

Мікроелектроніка дозволила розширити теоретичні і експериментальні дослідження в космосі, біології, фізиці. Вона застосовується і в автоматах, що працюють на Місяці і Марсі, і при вивченні біострумів в клітках живого організму.

Мікроелектроніка дозволила створити приймач радіопередач, що вміщується в дужці окулярів, телевізор, вбудований в браслет для ручного годинника, кишенькову обчислювальну машину тощо.

Промисловістю випускаються різноманітні логічні інтегральні схеми. В залежності від базового типу ключів виділяють такі типи інтегральних логічних схем:

- діодно-транзисторна логіка (ДТЛ);
- резистивно-транзисторна логіка (РТЛ);
- резистивно-ємнісна-транзисторна логіка (РЕТЛ);
- транзисторно-транзисторна логіка (ТТЛ);
- емітерно-пов'язана транзисторна логіка (ЕПТЛ);
- транзисторно-транзисторна логіка з бар'єром Шоткі (ТТЛШ);
- логіка на МОН-структурах (МОНЛ);
- логіка на комплементарних МОН-структурах (КМОН);
- інжекційно-інтегральна логіка (ІЛ).

4.2 Логічні елементи

4.2.1 Транзисторний ключ

Ключем прийнято називати пристрій, який призначений для вмикання та вимикання кола навантаження під дією управляючих сигналів. Найбільш поширена схема транзисторних ключів (4.1) є схема із спільним емітером (СЕ).

В цій схемі вихідний струм $I_{вих} = I_{\kappa}$ значно більший вхідного $I_{вх} = I_{\sigma}$, оскільки

$$I_{вх} = I_{\sigma}, I_{\kappa} \approx \beta \cdot I_{\sigma},$$

де β – статичний коефіцієнт підсилення струму бази. У поширених біполярних транзисторах $\beta = 10-100$.

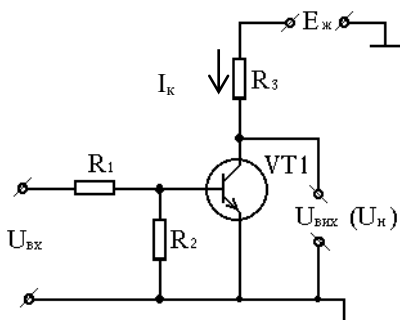


Рисунок 4.1 – Схема біполярного ключа із спільним емітером

Вхідна напруга $U_{вх}$ прикладена до ($n-p$) переходу емітер-база, а вихідна напруга $U_{вих}$ до емітер-колекторного переходу, адже вона може бути значно більшою від вхідної.

Тому для транзисторного ключа коефіцієнт підсилення по напрузі K_U – дорівнює:

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} > 1.$$

Транзистор $VT1$ може перебувати у закритому чи відкритому стані (основний принцип роботи транзисторного ключа). Якщо на вхід транзистора не надходить вхідний сигнал ($U_{вх} = 0$ – в цьому випадку стан транзистора – закритий, крізь нього не проходить струм. При наявності резистора R_K , колекторного навантаження, на виході транзисторного ключа формується сигнал високого рівня тому, що $U_{вих} \rightarrow E_{жив}$.

Якщо на вхід транзисторного ключа подати сигнал рівня достатнього для повного відкриття транзистора $U_{від}$. (у сучасних транзисторах малої і середньої потужності він становить – 0,6-1 В, а для транзисторів великої потужності – 1-2 В), в колекторному колі буде протікати струм $I_{\kappa} \approx \beta \cdot I_{\phi}$, який на резисторі R_3 відтворює падіння напруги U_{R3} . У цьому разі:

$$U_{вих} = U_{ке} = E_{жив} - U_{R3}. \quad (4.2)$$

Падіння напруги на колекторно-емітерному переході у більш сучасних транзисторах знаходиться у межах (0,2...1В) в залежності від типу транзистору. Також від типу транзистора, який використовується у схемі ключа, рівень логічного “0” теж знаходиться в межах 0,2–2В.

Транзисторний ключ виконує операцію “заперечення” і виступає у ролі інвертора. – формує вихідні сигнали рівня логічної “1” або логічного “0”, в залежності від вхідного сигналу.

Великого поширення набули електронні ключі, виконані на польових транзисторах МДН – структури метал-оксид-напівпровідник. На базі МДН – транзисторів створюють ключі близькі до ідеальних (рис. 4.2).

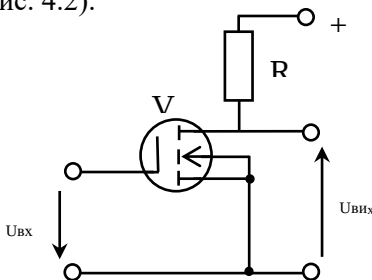


Рисунок 4.2 – Схема транзисторного ключа

Принцип роботи ключових схем, з використанням польових транзисторів, відповідає схемам з біполярних транзисторів коли ключ увімкнутий то його опір практично дорівнює нулю, а коли вимкнутий – він становить близько 10^{12} Ом, тобто безмежно великий.

Переваги ключів на польових транзисторах: відсутність залишкової напруги при відкритому транзисторі; мала потужність у колі управління. До недоліків можна віднести – нижча швидкодія порівняно з ключами на біполярних транзисторах.

4.2.2 Різновид логічних елементів

Логічний елемент – пристрій, призначений для обробки інформації в цифровій формі (послідовності сигналів високого – «1» і низького – «0» рівнів. У двійковій логіці, послідовність «0», «1» та «2» в трійковій логіці, послідовності «0», «1», «2», «3», «4», «5», «6», «7», «8» та «9» в десятковій логіці). Фізично логічні елементи можуть бути виконані механічними, електро-механічними (на електромагнітних реле), електронними (на діодах і транзисторах), пневматичними, гідравлічними, оптичними тощо.

Із розвитком електротехніки від механічних логічних елементів поступово перейшли до електромеханічних логічних елементів (на електромагнітних реле), а потім до електронних логічних елементів на електронних лампах, пізніше – на транзисторах.

Схеми логічних елементів (АБО) та (І) можуть бути виконані на резисторах (резисторна логіка), на діодах (діодна логіка), на транзисторах (транзисторна логіка). Широкого поширення ця логіка набула у інверторних схемах, для утворення логічних елементів (АБО-НІ) та (І-НІ). Нині найбільш розповсюдженими є схеми типу ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка. Основою схем ТТЛ є багатоєміторний транзистор, дозволяючи поєднати переваги діодних і транзисторних елементів (рис. 4.3). Багатоєміторний транзистор збільшує швидкодію схеми ТТЛ за рахунок малої вхідної ємності навантаження і низького вхідного опору.

Кожний емітерний перехід багатоємітерного транзистора замінює діод, якщо емітерні переходи закриті високим рівнем напруги, то колекторний перехід відкритий і колекторний струм буде спрямований у базу транзистора VT2, підтримуючи його у відкритому стані, отже на виході схеми логічного елемента в ньому разі буде низький рівень напруги.

Якщо на входах транзистора VT1 з'явиться хоч б один низький рівень напруги, то відповідний емітерний перехід відкриється, а транзистор VT2 закриється при цьому на виході схеми з'явиться високий рівень напруги. Схема виконує функції логічного елемента (3І-НІ).

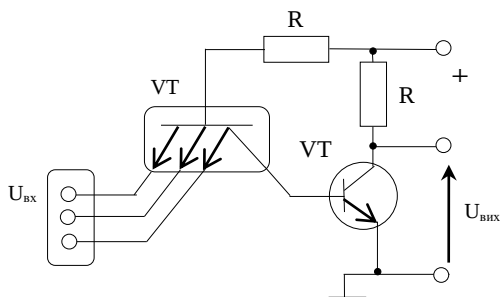


Рисунок 4.3 – Елемент 3І-НІ на ТТЛ

Схеми ТТЛ мають більш широкі функціональні можливості, дозволяють реалізувати функції (І-АБО-НІ), (І-АБО), (І-НІ) та інші. Схеми ТТЛ мають ряд переваг та недоліків:

- до переваг варто віднести високу швидкодію, навантажуючу здатність;
- до недоліків – складність виготовлення багатоемітерних транзисторів.

Наприкінці 70-х років ХХ ст. мікросхеми ТТЛ стали активно замінюватись на мікросхеми ТТЛШ, які мають у своїй структурі *p-n*- переходи з бар'єром Шотткі.

Ефект Шотткі оснований на тому, що у *p-n* переході або поруч з ним присутній дуже тонкий шар металу, багатий електронами – вільними носіями.

Ефект Шотткі змінює порогову напругу, яка відкриває транзистор від звичайних $\approx 0,7\text{В}$ до $0,2...0,3\text{В}$, і значно зменшує час життя неосновних носіїв у напівпровіднику.

Елементною базою великих інтегральних схем, а також цифрових мікросхем серії КМОП, практично є транзистори МДН. Мікросхеми КМОП мають середню швидкість, але відрізняються від інших серій дуже малою споживаючою потужністю (мкВт) і великим входним опором.



Запитання для самоперевірки

1. Інтегральна мікросхема –це...
2. Що уявляють собою елементи ІМС?
3. За якими ознаками здійснюється класифікація ІМС ?
4. Які функціональні напрямки ІМС?
5. Які основні параметри ІМС?
6. Що уявляють собою логічні елементи?

Розділ 5

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Засоби вимірювань. Загальні уявлення
Вимірювальні прилади. Загальні уявлення

5.1 Засоби вимірювань. Загальні уявлення

Засіб вимірювань (ЗВ) – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань, має нормовані метрологічні характеристики, котрий відтворює та (або) зберігає одиницю фізичної величини, розмір якої приймається сталим в межах визначеної похибки протягом визначеного інтервалу часу. За конструктивним виконанням засоби вимірювань поділяються на:

- міри фізичних величин;
- вимірювальні прилади;
- вимірювальні перетворювачі;
- вимірювальне устаткування;
- інформаційно-вимірювальні системи;
- вимірювально-обчислювальні комплекси.

5.1.1 Міра фізичної величини

Міра фізичної величини – засіб вимірювальної техніки, призначений для відтворення та зберігання однієї або декількох відомих значень фізичної величини.

Міри фізичної величин поділяються:

- за принципом вимірювання;
- за призначенням;
- за родом фізичної величини.

За принципом вимірювання

Однозначна міра – міра, що відтворює одне значення фізичної величини (наприклад, гиря масою 1 кг).

Багатозначна міра – міра, що відтворює декілька значень фізичної величини (наприклад, лінійка, електричний конденсатор змінної ємності, змінний електричний опір).

Магазин мір – тобто набори мір, у яких вони об'єднані в єдине конструктивне ціле із пристроєм для їхнього з'єднання в різних варіантах сполучень (магазин опорів, магазин індуктивностей).

Зразкова речовина – зразкова міра у вигляді речовини з визначеними властивостями, що відтворюються при дотриманні умов виготовлення, затверджених у специфікації на цю міру, наприклад чисті гази (водень, кисень), чисті метали (срібло, платина та ін.)

Стандартний зразок – міра у вигляді речовини, за допомогою якої розмір фізичної величини відтворюється як властивість або як склад речовини, з якого виготовлений стандартний зразок, наприклад, стандартний зразок властивостей легованої сталі чи феромагнітного матеріалу визначеної марки.

За призначенням міри поділяються на:

Еталони займають чільне місце серед мір, мають найвищу точність і призначені для відтворення та зберігання одиниць фізичних величин з метою передачі їх розміру зразковим мірам.

Зразкові міри передають розмір фізичних величин робочим мірам, які призначені для визначення метрологічних характеристик засобів вимірювання.

Зразкові засоби вимірювань – це затверджені в установленому порядку міри, вимірювальні прилади або ж вимірювальні перетворювачі, які призначені для перевірки та градування за ними інших засобів вимірювальної техніки.

Робочі засоби вимірювань призначені для вимірювань, не зв'язаних із передачею величини одиниць фізичних величин. У цій групі виділяють точніші засоби вимірювань – лабораторні і менш точні – технічні.

За родом фізичної величини міри поділяються на:

- *електричного опору* – це вимірювальні котушки опору (однозначні) і магазини опорів (багатозначні).

- *індуктивності* та взаємної індуктивності, що називають вимірювальними котушками індуктивності, випускаються з класами точності від 0,5 до 0,05.

- *вимірювальні конденсатори* як однозначні міри ємності та магазини конденсаторів як багатозначні міри. Вимірювальні конденсатори мають клас точності від 0,005 до 1.

5.1.2 Еталони одиниць фізичної величини

Еталон (одиниці фізичної величини) – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам вимірювальної техніки, що стоять нижче за повірочною схемою, офіційно затверджений як еталон.

Усі основні одиниці фізичних величин відтворюються з найвищою точністю за допомогою міжнародних еталонів відповідних одиниць і зберігаються у Міжнародному бюро мір та ваги у спеціальних лабораторіях у місті Севр поблизу Парижа. Програмою діяльності цього бюро передбачені систематичні зіставлення національних еталонів провідних метрологічних лабораторій різних держав з міжнародними еталонами та між собою. Основне призначення еталонів – бути матеріальною базою для відтворення та збереження одиниць фізичних величин.

Класифікація еталонів за призначенням:

Первинний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини найвищою в країні (у порівнянні з іншими еталонами тієї ж одиниці) точністю.

Спеціальний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці в особливих умовах і замінює в цих умовах первинний еталон. Застосовуються для відтворення одиниць в особливих умовах, коли пряма передача розміру одиниці від еталонів технічно неможлива із заданою точністю (високий тиск, температура, частота тощо).

Державний еталон – первинний або спеціальний еталон, затверджений офіційно як державний. Державні еталони є основою технічної бази державної метрологічної системи.

В Україні статус державних еталонів надається первинним еталонам, створення і вдосконалення яких здійснюється відповідно до державних науково-технічних програм, які розроб-

ляються ЦОВМ, з метою забезпечення потреб життє-діяльності людини, економіки і оборони України та інших сфер.

Вторинний еталон – еталон, якому передається розмір одиниці фізичної величини від первинного або спеціального еталона.

Еталон-копія – вторинний еталон, який призначається для передавання розміру одиниці фізичної величини робочим еталонам (зразковим з вимірювальної техніки).

Еталон передавання – вторинний еталон, що призначається для взаємного звіряння еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо.

Еталон-свідок – вторинний еталон, призначений для перевірки збереження державного еталона та для заміни його у разі псування або втрати. Він має найвищу серед вторинних еталонів точність та використовується тільки тоді, коли державний еталон не можна відтворити.

Робочий еталон – еталон, призначений для передачі розміру фізичної величини зразковим засобам вимірювальної техніки, а в окремих випадках – робочим засобам вимірювальної техніки.

5.2 Вимірювальні прилади. Загальні уявлення

Вимірювальний прилад – це засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірюваної інформації. Основне призначення вимірювальних приладів – візуальний показ контрольованого параметра за допомогою індикаторного пристрою, реєстрація його значення на різних носіях, вироблення сигналу поточного значення для системи регулювання. Виділяють вимірювальні прилади, які показують і реєструють.

Вимірювальні прилади класифікують: за способом подання вимірювальної інформації – ті, що показують і реєструють.

Прилад, який показує (рис. 5.1) – допускає тільки відлічування показів значень вимірюваної величини. Розрізняють амперметри, вольтметри, манометри, термометри, лічильники води та газу та ін.



Рисунок 5.1–Вольтметр

я – самописні й друкуючі прилади. Реєстрацію значень в цифрових формах можна віднести цифрові прилади, які здатні запам'ятовувати вимірювальну інформацію.

За видом вимірювання – аналогові (безперервні) і цифрові (дискретні).

В аналогових приладах вимірювальна інформація перетворюється за допомогою аналогових електронних пристроїв: вимірювальних підсилювачів, функціональних перетворювачів інформації тощо. Вихідний сигнал таких приладів є неперервною функцією вимірювальної величини і відображається за допомогою шкали та показчика.

Приведене, згідно з ДСТУ 2681, визначення цифрового вимірювального приладу базується на формі подання результату вимірювання, тобто особливість цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) полягає в тому, що результат вимірювання відбивається на шкалі пристрої у вигляді числа, як правило, десяткового, або символів.

За видом енергії, що використовується – електричні, пневматичні і гідравлічні прилади.

За застосуванням й конструктивним виконанням – стаціонарні, щитові, панельні, переносні.

За видом перетворення вимірювальної величини – електричні та неелектричні. Прилади для вимірювання неелектри-

чних величин конструктивно складаються з двох самостійних пристроїв – первинного вимірювального перетворювача і вторинного вимірювального пристрою.

Вторинний вимірювальний пристрій – елемент вимірювальної інформаційної системи, який показує або реєструє значення вимірюваних величин.

Вимірювальні прилади характеризуються наступними параметрами:

- *Діапазон вимірювань* – метрологічна характеристика, що визначає інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого прономовані похибки засобу вимірювань.

- *Поріг чутливості* – найменше значення вимірюваної величини, яка може бути виявлена засобом вимірювань. Чутливість пов’язує зміну значення вимірюваного параметра з відповідною йому зміною показів приладу.

- *Точність* – ступінь збігання показів вимірювального приладу з істинними значеннями вимірюваних величин. Чим менша ця різниця, тим більша точність приладу (див. клас точності).

- *Стабільність* – це здатність засобу вимірювальної техніки зберігати свої метрологічні характеристики в заданих границях протягом заданого інтервалу часу.

5.3 Вимірювальні перетворювачі

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, призначений для формування на своєму виході сигналу, що функціонально зв’язаний із сигналом вимірюваної інформації на вході у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та збереження. Вимірювальна операція, яка здійснюється вимірювальним перетворювачем носить назву «вимірювальне перетворення».

На відміну від вимірювального приладу, сигнал на виході вимірювального перетворювача (вихідна величина) безпосередньо не сприймається спостерігачем. Обов’язкова умова

вимірювального перетворення – збереження у вихідному сигналі інформації про кількісне значення вимірюваної величини через забезпечення функціональної залежності (переважно, лінійної) між вимірюваною величиною та сигналом на виході. У структурі давача (датчика) зазвичай виділяють вимірювальний перетворювач, що безпосередньо пов'язаний з вимірюваною величиною.

Первинним вимірювальним перетворювачем, або чутливим елементом, називається перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання і видає сигнал вимірювальної інформації. Первинний вимірювальний перетворювач у значній мірі визначає основні технічні характеристики давача.

Основні характеристики вимірювальних перетворювачів:

- номінальна статична характеристика перетворення (градувальна характеристика) – залежність між інформативними параметрами вхідного і вихідного сигналів;
- коефіцієнт перетворення – коефіцієнт пропорційності лінійної залежності вхідного і вихідного сигналів;
- чутливість – відношення приросту вихідного сигналу до відповідного йому приросту вхідного сигналу (для випадку лінійної залежності чутливість збігається з коефіцієнтом перетворення);
- діапазон вимірювань – різниця граничних величин, що обмежують діапазон вимірюваної величини у якому робота вимірювального перетворювача задовольняє поставленим вимогам.

Принцип роботи вимірювального перетворювача може базуватись на використанні практично будь-яких фізичних явищ. Задача полягає в розробці на основі цих явищ принципів дії перетворювачів і доведення їх до конкретних методів та конструкцій, що забезпечували б, у першу чергу, необхідні метрологічні характеристики в заданих умовах застосування. У зв'язку з широким використанням передачі сигналів у вигляді електричних величин класифікація перетворювачів за видом сигналу може бути зведена до наступних видів:

- перетворення електричних величин в електричні (подільники напруги і струму, вимірювальні трансформатори, вимірювальні підсилювачі струму і напруги);
- перетворення неелектричних величин в електричні (термопари, терморезистори, тензорезистори, фотоелементи, реостатні, ємнісні та індуктивні датчики переміщення і т.д.);
- перетворення електричних величин в неелектричні (механізми електровимірювальних приладів, що перетворюють величину сили струму чи напруги у відхилення стрілки чи світлового променя, датчики ультразвукових витратомірів тощо).

5.3.1 Параметричні перетворювачі

До параметричних перетворювачів відносяться: резистивні, індуктивні, трансформаторні і ємнісні перетворювачі. Їх широко використовують для перетворення неелектричних величин (переміщення, зусилля, тиску, температури та ін.) у електричні величини (напругу, струм, частоту та ін.).

Потенціометричні лінійні перетворювачі. Лінійний потенціометричний перетворювач (ПП) має лінійну статичну характеристику в режимі холостого ходу. На рис 5.2 зображено потенціометричний перетворювач .

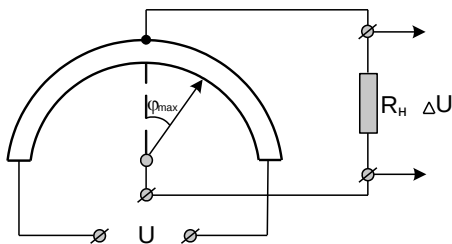


Рисунок 5.2 – Потенціометричний перетворювач

Чутливість ПП з кутовим переміщенням движка становить:

$$S = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} = \frac{u}{\varphi_{ia}}. \quad (5.1)$$

Для ПП з лінійним переміщенням движка $S = \frac{\Delta u}{\Delta l} = \frac{u}{l}$, звідки можна отримати значення крутості характеристики ПП. Опір обмотки ПП лінійним переміщенням движка:

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\omega} \cdot \omega}{q \cdot 10^3}, \quad (5.2)$$

де ρ – питомий опір проводу обмотки. Ом·мм²/м; l_{ω} – середня довжина одного витка, мм; ω – число витків обмотки на каркасі; q – площа поперечного перерізу проводу обмотки, мм².

Як приклад розглянемо ПП для сигналізації зміни тиску. Принципову схему сигналізатора зображено на рис. 5.4. Мембрана використовується як чутливий елемент і дає переміщення движка $\Delta l = 1$ мм при зміні тиску наприклад на 0,1 ат.

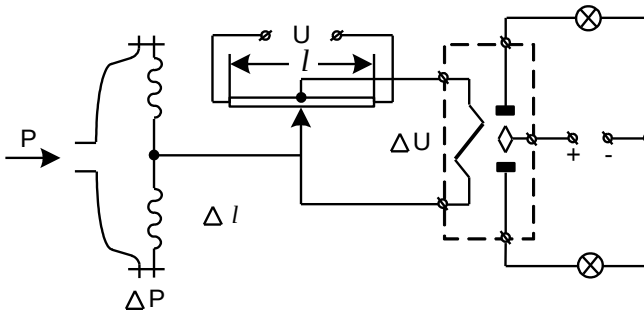


Рисунок 5.3 – Потенціометричний перетворювач для сигналізації зміни тиску

Ємнісний перетворювач. Для перетворення зміни ємності у відповідні зміни сили струму, напруги або частоти найчастіше застосовують мостову схему вмикання ЄП (рис. 5.5).

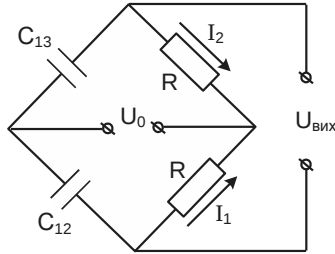


Рисунок 5.4– Мостова схема ввімкнення ЄП

За середнього положення рухомої пластини – $C_{12} = C_{13}$, тобто приріст $\Delta = 0$, міст збалансований і напруга на його виході дорівнює нулю.

Опір ЄП визначається за формулою:

$$R_c = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (5.3)$$

де C – ємність ЄП, Ф; f – частота живлення ЄП, Гц.

Величина зворотного впливу ЄП визначається силою електростатичного притягання між пластинами, H .

$$F_e = \frac{dW_e}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{CU_0^2}{2} \right) = \frac{U_0^2}{2} \frac{dC}{d\delta}, \quad (5.4)$$

де W_e – енергія електростатичного поля, Дж; $\Delta\delta$ – зазор, м;
 C – ємність, Ф; U_0 – напруга джерела живлення, В.

При $C, \delta = \text{const}$ – $F_e = U^2/2 \cdot C/\delta$.

Індуктивні перетворювачі. Індукційними перетворювачами можуть бути безпосередньо виміряні різні механічні величини: лінійні і кутові переміщення, рівень швидкості чи прискорення деталей, що рухається, деформація деталей, їхні розміри.

До переваг індуктивних перетворювачів відносяться: простота конструкції і надійність у роботі; відносно велика потужність на виході, що дає можливість безпосередньо до перетворювача підключати вимірювальний прилад; можливість живлення від мережі промислової частоти.

5.3.2 Генераторні перетворювачі

Генераторні перетворювачі – перетворюють вхідні величини в електрорушійну силу. Вони не потребують енергії додаткових джерел живлення, оскільки використовують енергію вхідного сигналу. Найбільшого поширення набули індукційні, термоелектричні, п'єзоелектричні, фотоелектричні перетворювачі тощо. У якості генераторного перетворювача на рис. 5.6. зображений фотогальванічний перетворювач.

Фотогальванічні перетворювачі – це прямі перетворювачі світлової енергії в електричну. До основних світлових характеристик фотогальванічного перетворювача відноситься: напруга холостого ходу та струм короткого замикання.

Напругу холостого ходу визначають за формулою:

$$U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_0}{I_{\phi}} + 1\right), \quad (5.7)$$

де I_{ϕ} – фотострум; I_0 – тепловий струм.

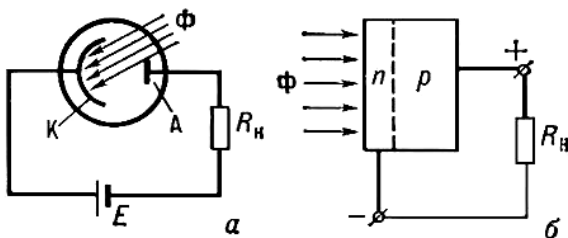


Рисунок 5.5 – Структура фотоелемента:

а) лампового; б) напівпровідникового; Φ – фотони світлового випромінювання; А – анод; К – катод; n – область з електронною провідністю; p – область з дірковою провідністю.

Фотоелементи використовують для реєстрації світлових потоків, контролю різних величин за допомогою світла, а також в якості джерела живлення (сонячні батареї). Деякий тип фотоелементів (кремнієві) можна застосовувати для вимірювання температури в межах від 350 до 2000 °С.

Термоелектричні перетворювачі. Принцип дії термоелектричного перетворювача (термопари) ґрунтується на

використанні термоелектричного ефекту, суть якого полягає у виникненні термоелектричної рушійної сили (термо-ЕРС) в колі, що складається з двох різнорідних (А, Б) провідників або напівпровідників, які називаються термоелектродами. У термопар термо-ЕРС виникає за наявності різниці температур місць з'єднання різнорідних провідників (рис. 5.6). Для металевих пар за невеликої різниці температур рівняння термо-ЕРС:

$$E_{ав} = e(t_1 - t_2) \quad , \quad (5.8)$$

де t_1 і t_2 – температура спаїв; e – константа даної пари провідників.

Термоелектричні перетворювачі застосовують для вимірювання та контролю температури, як всередині, так і на поверхні об'єктів дослідження (наприклад, для вимірювання температури ґрунту, водного розчину, температури димових газів на виході топки котла тощо).

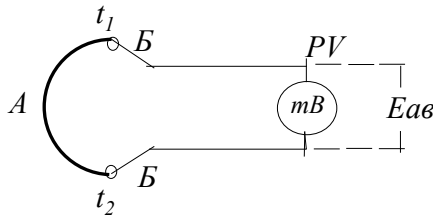


Рисунок 5.6 – Термопара з вимірювальним приладом

П'єзоелектричні перетворювачі. Робота п'єзоелектричних перетворювачів ґрунтується на використанні п'єзоелектричного ефекту, що представляє собою здатність деяких матеріалів утворювати при механічному напруженні (від латинського *piezo* – стискаю) електричні заряди. Розрізняють прямий і зворотний п'єзоелектричний ефект.

Прямий п'єзоелектричний ефект оснований на появі електричних зарядів на гранях деяких діелектриків під впливом механічних напруг. При зникненні напруг

діелектрик знову приходить у не наелектризований стан. Подібні діелектрики називаються п'єзоелектричними.

Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає в тім, що в п'єзоелектриків, що розташовуються в електричне поле, відбувається зміна геометричних розмірів.

Кількісно п'єзоефект оцінюється п'єзомодулем H , що встановлює пропорційність між виникаючим зарядом Q , і накладеною силою P :

$$Q = dP. \quad (5.9)$$

Слід зазначити, що значення п'єзомодуля для монокристалічних п'єзоелектриків залежить від взаємної орієнтації кристалографічних осей, напрямку дії сил і граней, з яких знімають заряд.

На практиці для побудови п'єзоперетворювачів з монокристала п'єзоелектрика вирізують елемент у вигляді шайби, чи пластинки диска таким чином, щоб найкращим способом використовувати властивості монокристала.

При практичному використанні звичайно вимірюють не заряд, а напругу на конденсаторі C , утворену струмо'земними гранями елемента п'єзоелектрика:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{dP}{C}. \quad (5.10)$$

При механічному впливі на п'єзоелемент на його електродах, згідно (1.8), виникає напруга.

Для виміру цієї напруги до п'єзопретворювача підключають підсилювально-реєструючу апаратуру. Еквівалентна сила п'єзопретворювача, зображена на рис. 1.12, на якому C_0 – ємність між електродами п'єзоелемента (ємність перетворювача); C_{ex} – ємність кабелю і вхідна ємність підсилювача; R_0 – опір перетворювача з урахуванням опору витоку по поверхні п'єзоелемента й опору ізоляції; R_{ex} – вхідний опір підсилювача.

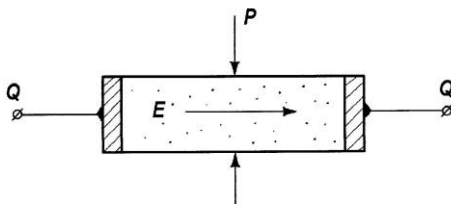


Рисунок. 5.7– Схема навантаження і включення п'єзокерамічних елементів



Запитання для самоперевірки

1. Як поділяються міра фізичної величини за призначенням?
2. Як класифікують еталони одиниць фізичної величини?
3. Які основні характеристики вимірювальних перетворювачів?
4. Як поділяються за конструктивним виконанням засоби вимірювань?
5. Як характеризуються за параметрами вимірювальні прилади?

Частина 3

ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ АВТОМАТИКИ

Розділ I

ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО АВТОМАТИКУ ТА АВТОМАТИЗАЦІЮ

Основні поняття та терміни

Історичні аспекти автоматизації

Основні накреслення автоматичного керування

Засоби автоматизації

Переваги та вади автоматизації

1.1 Основні поняття та терміни

Автоматика – галузь науки і техніки, яка розробляє технічні засоби і методи для здійснення технологічних процесів без безпосередньої участі людини, або – сукупність механізмів, приладів, що діють автоматично.

Нині автоматизація широко застосовується в різних галузях господарювання: промисловості, зв'язку, на транспорті, в комунальному господарстві, а також у військовій справі.

Ці задачі вирішуються шляхом створення систем автоматизації як інформаційно-об'єднаної сукупності програмованих пристроїв автоматизованого та автоматичного контролю, регулювання та керування. Системи автоматизації будуються на основі пристроїв промислової автоматики.

Прогрес суспільства, науково-технічна революція можливі тільки на основі широкого впровадження нової техніки, комплексної механізації і автоматизації виробничих процесів в усіх галузях господарства.

Автоматизація – один з напрямів науково-технічного прогресу, який спрямовано на застосування саморегульованих технічних засобів, економіко-математичних методів і систем керування, що звільняють людину від участі у процесах

отримання, перетворення, передачі і використання енергії, матеріалів чи інформації, істотно зменшують міру цієї участі чи трудомісткість виконуваних операцій.

Термін автоматизація, натхненний словом автоматичний (похідне з автомата), не було широко використано до 1947 року, коли Форд заснував відділ автоматизації.

Саме у цей час, у промисловості швидко починають використовуватися контролери зворотного зв'язку, які з'явилися ще 1930 року.

Автоматизації, було досягнуто за рахунок різних засобів, що охоплюють: механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні, електронні пристрої та комп'ютери, як правило, у поєднанні.

Складні системи, такі як: сучасні заводи, літаки та кораблі, найчастіше, використовують усі ці змішані застосування.

1.2 Основні накреслення автоматичного керування

Термін *“керування”* (вживається також *“управління”*) охоплює надзвичайно широке коло понять, що викликано різною природою об'єктів, наприклад керування технологічним процесом, підприємством чи державою.

Крім того, під керуванням (управлінням) розуміють також командування військами, керування транспортними засобами (судном, літаком, автомобілем), диригування оркестром і інша.

З цієї точки зору теорія автоматичного управління – частина кібернетики, яка вивчає процеси використання інформації і управління в системах різної фізичної природи.

Автоматичне керування – сукупність дій, які вибрані із множини можливих і направлені на підтримання або покращення функціонування керованого об'єкта згідно мети його керування, яке неможливе без автоматичного регулювання та контролю.

Автоматичне регулювання – це підтримання постійним або змінним за певним законом якоїсь вихідної величини, що характеризує процес.

Автоматичний контроль – це контроль різних параметрів, величин в об'єкті з метою встановити: чи не вийшли вони за межі допустимих значень. Загальний випадок побудови системи автоматичного керування (САК).

Загалом, існує два види керування системою: зі зворотним зв'язком (система замкнутого контуру) та без зворотного зв'язку (система розімкнутого контуру).

У разі керування без зворотного зв'язку, дія впливу контролера на систему, не залежить від «виходу процесу» (або «контрольованої змінної процесу»).

Хорошим прикладом цього, є центральне опалення, у якому паровий котел керується лише за допомогою реле часу (або й без нього – вручну), таким чином, кількість тепла виробляється постійно, незалежно від температури у будівлі. Дією впливу, тут є вмикання і вимикання котла – виходом процесу, є температура у приміщенні.

У системі керування зі зворотним зв'язком, вплив від контролера, залежить від виходу процесу.

Для прикладу з котлом, це буде застосування термостату за для контролю температури усередині, або одночасно і ззовні будівлі (давачі температури), таким чином, з'являється зворотний зв'язок вихідного сигналу, який дає змогу контролеру підтримувати температуру у споруді, котру встановлено на термостаті.

Отже, контролер замкнутого контуру, має петлю зворотного зв'язку, яка забезпечує його керувальним впливом, залежно від виходу процесу. З цієї причини, замкнені петльові контролери, також називають контролерами зворотного зв'язку.

Ці теоретичні розуміння і застосування, позначаються 1920-ми роками, і їх впроваджено практично в усіх аналогових системах керування – спочатку у механічних контролерах, відтак, за допомогою дискретної електроніки, та останнім часом, у промислових комп'ютерних процесах.

Послідовне керування може здійснюватися або сталою послідовністю, або логічною одиницею, та виконує будь-які дії,

залежно від різних станів системи. Прикладом регульованої, але в іншому випадку, сталої послідовності, є реле часу.

Ранній розвиток послідовного контролю, був релей-ним, де реле замикали електричні контакти, задля початку або переривання живлення пристрою.

Використання реле задля управління, допускає контроль, керований подіями, де дії може бути запущено з послідовністю, відповідною до зовнішніх впливів. Вони були більш гнучкими у своїй відповіді, ніж жорсткі з однією послідовністю, кулачкові таймери тощо.

Комп'ютери можуть виконувати як послідовний контроль так і керування зі зворотним зв'язком. Програмовані логічні контролери (ПЛК) представляють собою тип мікропроцесора спеціального призначення, який замінює безліч апаратних складових, таких як таймери у системах логіки релейного типу.

Комп'ютери керування технологічними процесами загального призначення, все частіше замінюються самостійними контролерами, з одним комп'ютером, здатним виконувати операції сотень контролерів.

Комп'ютери, керування процесом, можуть обробляти дані з мережі ПЛК, приладів і контролерів, для реалізації типового (наприклад, PID) контролю багатьох окремих змінних або, у деяких випадках, для реалізації складних алгоритмів керування з використанням декількох входів і математичних перетворень.

Вони також, можуть аналізувати дані і створювати у реальному часі, графічні дисплеї та складати звіти для операторів, інженерів або керівництва.

1.3 Засоби автоматизації

Автоматизовані технології тепер служать основою для математичних та організаційних інструментів, використовуваних для створення складних систем. Відомими прикладами є – системи автоматизованого проектування (САПР) та автоматизованого виробництва. Інформаційні технології, разом з промисловими машинами та процесами, можуть допомогти у розробці, реалізації та моніторингу систем керування. Один із прикладів промислової системи керування, являє собою

програмований логічний контролер (ПЛК). ПЛК це спеціалізовані комп'ютери, які часто використовуються для синхронізації потоку вхідних даних від (фізичних) давачів і подій, з потоком виходів на виконавчі пристрої та події.

Людино-машинні інтерфейси (HMI) або інтерфейси комп'ютер – людина (CHI), зазвичай, використовуються для зв'язку з ПЛК та іншими комп'ютерами. Допоміжний персонал, який стежить та контролює через HMI, можна назвати різними іменами.

Існують різні види засобів автоматизації:

- ANN – штучна нейронна мережа;
- DCS – розподілена система керування;
- SCADA – диспетчерське керування та збір даних;
- PLC – програмований логічний контролер;
- робототехніка.

Коли справа доходить до автоматизації виробничих процесів, хост-моделювання програмного забезпечення (HSS), є широко використовуваним інструментом тестування, який застосовується для налаштування програмного забезпечення обладнання. HSS використовується для тестування продуктивності обладнання за заводськими стандартами автоматизації (тайм-ауту, часу відгуку, часу обробки).

1.4 Переваги та вади автоматизації

Основні переваги автоматизації:

1. Збільшення пропускної здатності або продуктивності.
2. Підвищення якості та передбачуваності якості.
3. Підвищена надійність, процесів або продуктів.
4. Підвищення узгодженості продукції.
5. Скорочення прямих людських витрат на робочу

силу та видатків.

Наступні методи часто використовуються задля підвищення продуктивності, якості або надійності.

Встановлення автоматизації операцій для скорочення часу циклу та де потрібен високий ступінь точності.

Заміна людських операторів у завданнях, де є важка фізична або марудна праця.

Основними вадами автоматизації – висока вартість автоматизації нового продукту, як правило, вимагає дуже великих початкових інвестицій порівняно з питомою вартістю продукту, отже видатки на автоматизацію, може бути закладено у вартість багатьох продуктів протягом тривалого часу.



? Контрольні питання

1. Автоматика та автоматизація – це...
2. Автоматичне керування – це...
3. Автоматичне регулювання та контроль – це...
4. Наведіть приклади механізмів керування зі зворотним зв'язком.
5. Які основні вади автоматизації?
6. Які основні переваги автоматизації?

Розділ 2

СИСТЕМИ АВТОМАТИКИ. ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ

Класифікація систем автоматики
Основи управління. Загальні уявлення
Основні елементи автоматики

2.1. Класифікація систем автоматики

Як зазначалось, системи автоматики призначені для отримання інформації про хід процесу, що управляється, її обробки і використання при формуванні впливів управління на процес. Нагадаємо, що в залежності від призначення розрізняють такі автоматичні системи:

1. *Системи автоматичної сигналізації* – призначені для повідомлення обслуговуючого персоналу про стан того чи іншого технічного пристрою, про протікання того чи іншого процесу.

2. *Системи автоматичного контролю* – здійснюють без участі людини контроль різних параметрів і величин, які характеризують роботу якого-небудь технічного агрегату або протікання якого-небудь процесу.

3. *Системи автоматичного блокування і захисту* – служать для попередження виникнення аварійної ситуації в технічних агрегатах і пристроях.

4. *Системи автоматичного пуску і зупинки* – забезпечують включення, зупинку (а іноді і реверс) різних двигунів і приводів за заданою програмою.

5. *Системи автоматичного управління* – призначені для управління роботою тих чи інших технічних агрегатів або тими чи іншими процесами.

Важливими і найбільш складними є системи автоматичного управління.

2.2 Основи управління. Загальні уявлення

Управлінням в широкому розумінні називається організація будь-якого процесу, що забезпечує виконання поставленої мети. Загальні закони отримання, зберігання, передавання і переробки інформації в системах управління вивчає кібернетика.

Таким чином, вивчення систем автоматики також є однією з задач кібернетики. Отже, будь-яка автоматична система управління складається з окремих елементів, які пов'язані між собою.

Багатогранність автоматичних систем управління, що призначені для контролю та управління різними за своєю фізичною природою об'єктами, тягне за собою багатогранність елементів як у відношенні їх конструктивного виконання (фізичних процесів, що покладені в основу побудови, роду енергії, яку використовують при роботі), так і в плані виконуваних ними функцій.

Це призводить до необхідності здійснити класифікацію елементів, яка об'єднала б їх в окремі групи з однаковими класифікаційними ознаками, і що дозволить проводити дослідження не кожного окремого елемента, а цілого класу.

2.3 Режими роботи елементів автоматики

Як будь-який технічний пристрій, елементи автоматики мають два режими роботи: статичний і динамічний.

Статичний режим роботи. Однією з головних характеристик елементу в цьому режимі є статична характеристика елементу: $y = f(x)$. Вона представляє собою залежність вихідного сигналу елементу (y) від вхідного сигналу (x) в установленому (статичному) режимі роботи, коли ці сигнали не змінюються з часом або змінюються з постійною швидкістю.

На рис. 2.1. приведено приклади типових статичних характеристик елементів САУ – лінійна (1), нелінійна (2, 3), реверсивна (1, 2), неревверсивна (3).

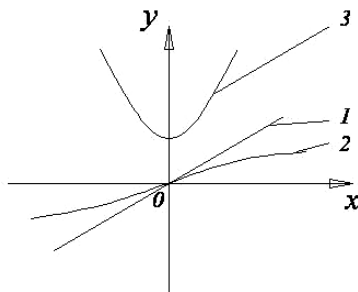


Рисунок 2.1 – Статичні характеристики елементів САУ

До загальних параметрів елементів автоматики відноситься коефіцієнт передачі. Його можна визначити по статичній характеристиці елемента. Розрізняють два види коефіцієнтів передачі: статичний і диференціальний. Статичний коефіцієнт передачі використовується для визначення властивостей елемента, що має лінійну статичну характеристику, і визначається з виразу:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

тобто є відношенням приросту вихідного сигналу до відповідного приросту вхідного сигналу. Отже, статичний коефіцієнт передачі є тангенс кута нахилу статичної характеристики до вісі абсцис.

Для елементів з нелінійною характеристикою використовують диференціальний коефіцієнт передачі:

$$k = \frac{dy}{dx}.$$

Значення цього коефіцієнта залежить від вхідного сигналу, тобто є змінною величиною. Коефіцієнт передачі має розмірність, фізичний сенс і назву, які відповідають призначенню елемента (наприклад, коефіцієнт підсилення,

фізичне визначення, чутливість, вольт-амперна характеристика та ін.).

Динамічний режим роботи. Цей режим роботи відповідає зміні сигналів на вході і виході елемента. Для описання властивостей елемента у цьому режимі використовуються динамічні характеристики: перехідна характеристика, частотна характеристика, передаточна функція та ін.

2.4 Класифікаційні ознаки за призначенням елементів автоматики

Зазвичай, за призначенням елементи автоматики розрізняють як: чутливі (вимірювальні), проміжні і виконавчі елементи. Строго кажучи, чутливим елементом є сприймальний елемент (термоопір, мембрана, п'єзокварцова пластина і ін.) первинного перетворювача (давача), що реагує на зміну величини, за функцією якої працює автоматична система. Але при класифікації за призначенням під *чутливим елементом* розуміється первинний перетворювач в цілому.

Проміжні елементи служать для перетворення значення або фізичної природи сигналу, котрий надходить від чутливого елемента, і який, в свою чергу, забезпечує роботу виконавчого елемента, що здійснює вплив управління на об'єкт.

Класифікаційні ознаки можуть бути головні і другорядні. Тому при їх виборі потрібно розглянути роль окремого елемента в системі, його характерні особливості, потім встановити можливі загальні ознаки і згрупувати за ними класи елементів, та, виходячи з головної мети – розробки системи управління, виділити головні і додаткові ознаки і розташувати їх в порядку важливості.

2.4.1 Класифікація за фізичним принципом дії

За фізичним принципом дії елементи поділяють на: механічні, теплові, електричні, магнітні, електромагнітні, напівпровідникові, оптоелектронні, акустичні та ін. Один і той же принцип дії може бути закладений в основу

елементів, які виконують різні функції, та навпаки, елементи, які виконують однакові функції, можуть мати різні принципи дії.

Фізичний принцип дії елементів обумовлює їх конструктивні форми та основні методи розрахунку.

За величиною вихідної потужності ділять на елементи:

- низької потужності (до 10 Вт);
- середньої потужності (10...100 Вт);
- великої потужності (300... 1000 Вт та більше).

За характером зміни вихідної величини можна виділити такі класи елементів: неперервний, пульсуючий, цифровий, релейний.

Важливою властивістю елемента є його здатність розрізняти зміни знаку або фази вхідного сигналу. За цією ознакою елементи поділяються на реверсні (двотактні), у яких знак (або фаза) вихідного сигналу змінюється при зміні знаку вхідного сигналу, і нереверсні (однотактні), у яких знак (або фаза) вихідного сигналу не залежить від полярності вхідного.

Однією з властивостей елементів СУА є спрямованість їх дії, тобто передача сигналу тільки в одному напрямку з входу на вихід. Якщо вхідний сигнал не залежить від вихідного, то такий елемент називають розімкнутим. Вихідний сигнал може здійснювати вплив на вхідний при частковій передачі енергії сигналу в зворотному напрямку – з виходу на вхід, тобто при наявності зворотного зв'язку між вихідними та вхідними колами.

Елементи зі зворотним зв'язком називають – замкненими. Зворотний зв'язок може бути позитивним або негативним. Різні види зворотних зв'язків широко використовують для зміни властивостей різноманітних елементів у бажаному напрямку до необхідного рівня.

Більш зручною для такої мети є класифікація елементів за їх функціональним призначенням та за видом рівнянь, які описують процеси в елементі, що виходить безпосередньо з самого процесу проектування системи, котрий поділяється на два етапи.

Уніфікація елементів полягає в розробці універсальних типів елементів, які придатні для використання в автоматичних системах управління об'єктами абсолютно різної фізичної природи. Уніфіковані елементи повинні легко сполучатись між собою, забезпечуючи оперативну і економічну побудову системи управління з використанням агрегатно-модульного підходу, який полягає в тому, що в його основі закладена не фізична природа впливу на вході системи або в середині каналу управління.

2.4.2 Класифікація по виконуваних функціях

По виконуваних функціях елементи автоматики діляться на датчики, підсилювачі, виконавчі пристрої, реле, обчислювальні елементи, погоджуючі і допоміжні елементи тощо. Розглянемо найпоширеніші елементи, що використовуються в системах автоматичного управління.

Датчики – сприймають поступаючи на їх вхід інформацію про управляючу величину і перетворюють її у форму, зручну для подальшого використовування в пристрої автоматичного управління. Більшість датчиків перетворить вхідний не електричний сигнал в електричний. Залежно від виду неелектричного вхідного сигналу датчики діляться на датчика механічних величин (переміщення, швидкість, прискорення), теплових величин, оптичних величин і інше.

Підсилювачі – елементи автоматики, що здійснюють кількісні перетворення – збільшення потужності вхідного сигналу (підсилення). В деяких випадках одночасно з кількісним перетворенням підсилювачі здійснюють і якісне перетворення, наприклад, постійного струму в змінний. Залежно від виду енергії, одержуваної підсилювачем від допоміжного джерела енергії, вони поділяються на електричні, гідравлічні, пневматичні і комбіновані (електрогідравлічні, електропневматичні і ін.). Найбільше поширення набули електричні підсилювачі, що мають високу чутливість, великий коефіцієнт підсилення і зручні в експлуатації.

Виконавчі пристрої – елементи автоматики, що здійснюють керуючий вплив на об'єкт управління. Вони змінюють положення або стан регулюючого органу об'єкту

управління так, щоб керований параметр відповідав заданому значенню.

В якості виконавчих пристроїв, що змінюють стан робочого органу, можуть використовуватися підсилювачі і реле.

Обчислювальні елементи здійснюють математичні перетворення (операції) з сигналами, які поступають на їх вхід з метою здійснення заданого алгоритму роботи системи. У простих випадках обчислювальні елементи виконують окремі математичні операції, такі, як алгебраїчне додавання, диференціювання, інтеграція, логічне додавання, множення тощо.

Як обчислювальний елемент може використовуватися мікропроцесор, спеціальні і універсальні ЕОМ (цифрові і аналогові) і навіть комплекс цих машин.

Такі задачі автоматичного управління, як оптимізація управління, створення адаптивних САУ, використання алгоритмів управління, застосованих на статистичних методах вірогідності обробки сигналів, неможливо здійснити без застосування ЕОМ.

Погоджувальні елементи – вмикаються в пристрій автоматичного управління для поліпшення його параметрів, розширенні функціональних можливостей основних елементів. В якості погоджувальних елементів часто використовують трансформатори, редуктори, що дозволяють погоджувати параметри виконавчого елемента з параметрами регулюючого органу об'єкту управління.

У САУ де використовується в якості обчислювального елемента мікропроцесор, часто виникає потреба погоджувати його з інформаційними датчиками і виконавчими елементами аналогового типу, які широко застосовуються в автоматичці.

Допоміжні елементи – до таких елементів автоматики можна віднести стабілізатори напруги або струму, комутатори і розподільники, генератори напруги спеціальної форми, формувачі імпульсів, індикаторні і реєструючі прилади, сигнальні і захисні пристрої і т. д. Ці елементи, не будучи принципово необхідними для роботи пристрою автоматичного управління, в той же час дозволяють підвищити його точність і

стабільність роботи, полегшують наладку і експлуатацію, розширюють можливості використання при створенні САУ.



Запитання для самоперевірки

1. Системи автоматики призначені для...
2. У залежності від призначення розрізняють такі автоматичні системи...
3. Що уявляє собою управління в широкому розумінні?
4. Які основні елементи автоматики ?
5. Які основні режими роботи елементів автоматики ?
6. Які основні класифікаційні ознаки за призначенням елементів автоматики ?

Розділ 3

ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ТЕОРІЮ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Основні поняття та терміни

Основи управління

Класифікація автоматизованих систем

(за видом процесу)

Узагальнена модель комп'ютерного управління процесом

Об'єкти і процеси управління. Додатний і від'ємний зворотні зв'язки

Властивості процесів, котрі ускладнюють управління

Загальна схема управління за замкненим циклом

Функціональна схема управління

Приклад системи управління за розімкненим циклом

3.1 Основні поняття та терміни

Теорія автоматичного управління (ТАУ) – наука, що виявляє загальні закономірності функціонування, що властиві для автоматичних систем різної фізичної природи, і на основі цих закономірностей розробляє принципи побудови високоякісних систем керування.

Вона також відноситься до розділу технічної кібернетики що вивчає способи керування різноманітними технічними пристроями, технологічними процесами і виробництвами.

При вивченні процесів управління абстрагуються від фізичних і конструктивних особливостей систем і замість реальних систем розглядають їхні адекватні математичні моделі.

Як вже частково зауважувалося система автоматичного керування (САК) включає об'єкт керування і пристрій керування.

Пристрій управління – сукупність технічних засобів, за допомогою яких здійснюється керування технологічними параметрами об'єкта керування.

Об'єкт управління (ОУ) – це пристрій (або сукупність пристроїв), що здійснює технічний процес і потребує спеціально організованих впливів ззовні для забезпечення свого алгоритму функціонування.

Алгоритм функціонування – сукупність правил, що ведуть до вірного виконання технічного процесу в якому-небудь пристрої або в сукупності пристроїв (системі).

Алгоритм управління – це сукупність настанов, що визначають характер впливів на ОУ з метою забезпечення його алгоритму функціонування.

Регулювання – окремий випадок керування, мета якого полягає в підтримці на заданому рівні однієї чи декількох регульованих величин.

Регулятор – перетворює похибку регулювання $\varepsilon(t)$ в керуючий вплив на об'єкт керування.

Задаючий вплив $g(t)$ – визначає необхідний закон регулювання вихідної величини.

Похибка регулювання $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$, різниця між необхідним значенням регульованої величини і поточним її значенням. Якщо $\varepsilon(t)$ відмінна від нуля, то цей сигнал поступає на вхід регулятора, який формує таку регулюючу дію, щоб у результаті з часом $\varepsilon(t) = 0$.

Збурюючий вплив $f(t)$ – порушує необхідний функціональний зв'язок.

Причини збурень – зміна навантаження та завади (зовнішні і внутрішні).

Функціональна схема елемента – схема системи автоматичного регулювання і керування, складена за функціями, яку виконує цей елемент.

3.2 Основи управління

Управління – це будь-який цілеспрямований процес при наявній інформації:

$$U = F(A, I),$$

де A – бажаний стан (рух, процес); I – інформація; U – управління (управляюча дія). Розрізняють автоматичне і автоматизоване управління.

Автоматичне управління передбачає мати в колі зворотного зв'язку тільки технічні засоби.

Автоматизоване управління передбачає у колах зворотного зв'язку наявність не тільки технічних засобів, але і людини (оператора) див. рис. 3.1.

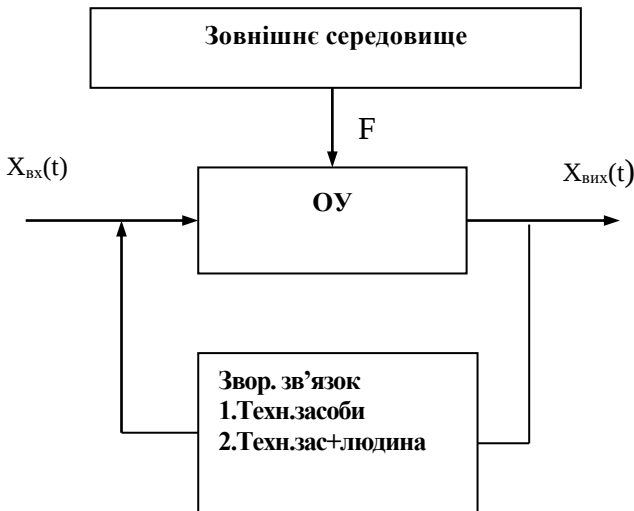


Рисунок 3.1 – Автоматизоване управління:

ОУ – об'єкт управління; $X_{\text{вх}}(t)$ – вхідна дія; $X_{\text{вих}}(t)$ – вихідна дія; F – збурюючі дії від впливу зовнішнього середовища, котрі намагаються вивести ОУ з заданого (бажаного) стану.

При розв'язанні складних задач, якщо недостатньо лише технічних засобів, то використовуються технічні засоби і людина (для прийняття рішень). Задача управління об'єктом зводиться до того, щоб вибрати необхідні вхідні дії $X_{\text{вх}}(t)$, котрі при будь-яких збурюючих діях F забезпечували б задане значення вихідної величини $X_{\text{вих}}(t)$. У системах автоматичного регулювання (АР) підтримується вихідна величина на одному заданому рівні (рис. 3.2,а). У системах автоматичного

управління (САУ) вихідна величина залежить від часу (рис. 3.2б).



Рисунок 3.2 – Залежить вихідної величини

Автоматичне і автоматизоване управління базується на загальних принципах і методах та використовується в складних великих системах, елементи яких значно важче описувати формалізовано, ніж елементи автоматичних систем.

Цей напрямок має такі складові:

1. Теорія інформації.
2. Теорія автоматів.
3. Теорія автоматичного управління.
4. Теорія розпізнавання образів.

Питаннями структурної організації систем великої складності та стохастичної поведінки з різноманітними взаємозв'язками займається системотехніка.

3.2.1 Класифікація автоматизованих систем за видом процесу

Різнманітність автоматизованих систем управління може бути класифікованою за видом процесу управління (рис. 3.3).

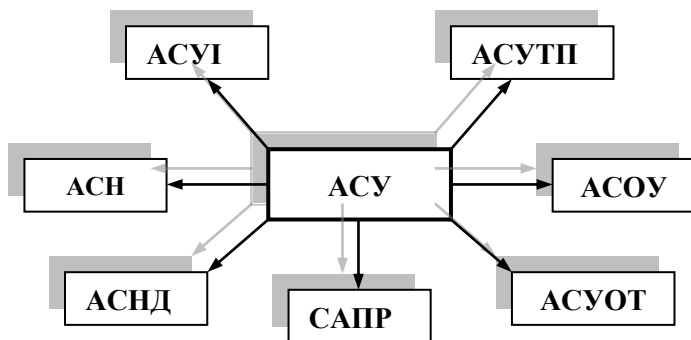


Рисунок 3.3 – Автоматизованих систем управління:

АСУТП – автоматизовані системи управління технологічними процесами.

АСОУ – автоматизовані системи організаційного управління.

АСУОТ – автоматизовані системи управління організаційно-технологічні.

САПР – системи автоматизованого проектування.

АСНД – науково-дослідні автоматизовані системи.

АСН – навчальні автоматизовані системи.

АСУІ – автоматизовані системи управління інформацією.

До прикладу розглянемо регулювання приводу лазерного компакт-диск. Для цього візьмемо привід CD-ROM (рис. 3.4).

В сучасних масових комп'ютерах, крім звичних пристроїв зовнішньої пам'яті на магнітних дисках, широко використовуються лазерні компакт-диски, першочергово розроблені для звукозапису/відтворення.

До речі, про термінологію: те, що для аудіоплатівок – програвач, те що для магнітних дисків – дисковод, а те, що для лазерних комп'ютерних дисків (КД) – привід.

Стандартна ємність компакт-диска ≈ 600 Мбайт. Ширина доріжки 1/200 товщини людської волосини.

Нормально може працювати така система при субмікронній точності позиціонування головки відносно

доріжки на диску (мікрон = 0,001 мм). На відміну від приводу магнітного диску, голівкою зчитування керує не одна, а цілих три САУ:

- 1) позиціонування на доріжці;
- 2) витримування висоти над доріжкою;
- 3) витримування постійної лінійної швидкості переміщення диску під голівкою зчитування.

Між іншим, навіщо тут потрібні САУ? Тому, що диск з'ємний, при обертанні має радіальні та вісьові биття – і щоб голівка читала потрібну доріжку, не розфокусовувалась необхідно на кожному оберті рухати голівку, відстежуючи ці биття.

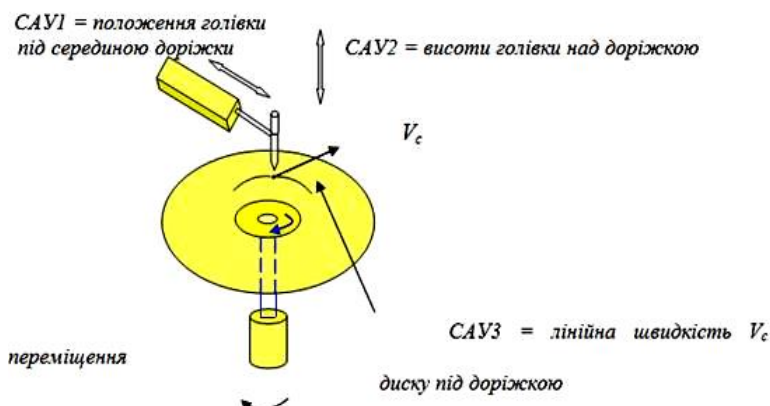


Рисунок 3.4 – Регулювання приводу лазерного компактдиску

3.2.2 Узагальнена модель комп'ютерного управління

Інформація – найважливіший компонент управління процесами, оскільки вона дозволяє краще використовувати дві інші складові процесу: матерію і енергію. Узагальнена модель комп'ютерного управління процесами зображена на рис. 3.6.

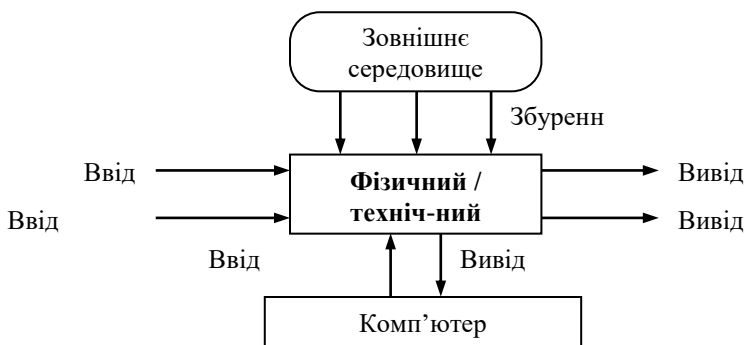


Рисунок 3.5 – Узагальнена модель комп'ютерного управління

3.2.3 Об'єкти і процеси управління. Додатний і від'ємний зворотні зв'язки

В теорії управління структура, зображена на рис. 3.6 є елементарною (фундаментальною) ланкою. Частина систем, в яких здійснюється фізичний чи технічний процес, називається *об'єктом управління* (ОУ), а коло зворотнього зв'язку (ЕОМ, комп'ютер) називається *управляючим органом* (УО). Для простоти будемо розглядати об'єкти управління (ОУ), які характеризуються однією змінною $X_{вх}$, однією змінною $X_{вих}$ та локалізованою збурюючою дією F . Зворотний зв'язок передбачає управління за замкненим циклом.

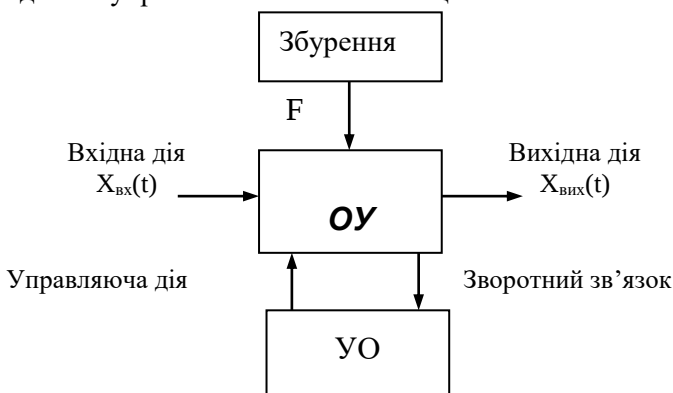


Рисунок 3.6 – Ланка управління

3.2.4 Властивості процесів, котрі ускладнюють управління

Рівень складності системи управління визначається в першу чергу, властивостями керованого процесу. Серед багатьох характерних особливостей процесів, котрі ускладнюють управління, найбільше впливають:

- нелінійність процесу;
- змінне зовнішнє середовище;
- зміна умов самого процесу;
- значні часові затримки (запізнення);
- внутрішні зв'язки процесу.

Запізнення сигналів чи наявність зон нечутливості (мертвих зон) є серйозною проблемою для керування. Через те, що регулятор функціонує на основі застарілих даних, тому він може видавати хибні (фальшиві) команди.

Регулятор в системі з часовими затримками повинен “пам'ятати” старі (попередні) керуючі дії.

Врахування внутрішніх взаємозв'язків додає багато складності в модель процесу, якщо навіть він в своїй основі простий.

Прикладом цього може служити задача регулювання температури в кімнатах будинку. Якщо вікно відчиняється в одній з кімнат, то температура змінюється не тільки локально, але і в деякій мірі в сусідніх кімнатах.

Модель системи з внутрішніми зв'язками зображена на рис. 3.7.

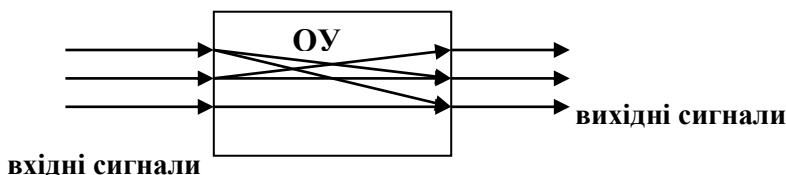


Рисунок 3.7 – Модель системи з внутрішніми зв'язками

3.2.5 Загальна схема управління за замкненим циклом

Загальна схема керування за замкненим циклом зображена на рис. 3.8.

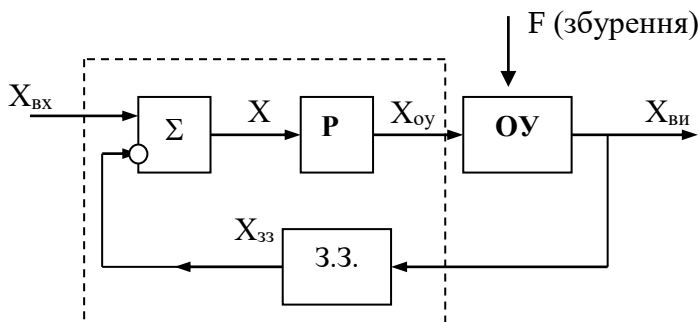


Рисунок 3.8 – Схема керування за замкненим циклом:
 Σ - суматор; P – регулятор; ОУ – об'єкт управління; ЗЗ – зворотній зв'язок.

При керуванні за замкненим циклом зміни вихідної величини передаються на вхід системи за допомогою сукупності пристроїв, які називаються *зворотним зв'язком*. Для забезпечення управління по замкнутому циклу необхідно забезпечити умову:

$$X_p = X_{\text{вх}} - X_{\text{з.з.}} \quad (3.1)$$

Додатний глобальний зворотний зв'язок, зображений на рис. 3.9, через пружне середовище, призводить до автоколивань. Невдале розміщення аудіоапаратури. Система стає нестійкою.

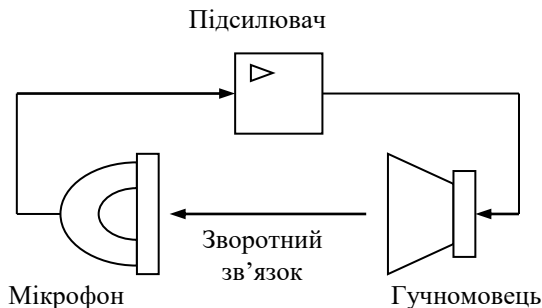


Рисунок 3.9 – Нестійка система

3.2.6 Функціональна схема управління

Функціональна схема управління зображена на рис. 3.10. Глобальний зворотний зв'язок включає в себе декілька конструктивних елементів, серед яких найбільш типові: перетворювачі, давачі, які призначені для перетворення однієї величини в іншу, найбільш зручну для управляючого сигналу.

Перетворювачами можуть бути: трансформатори, випрямлячі, інвертори, індуктивні елементи, давачі температури, тиску, частоти обертання. Послідовні і паралельні коректуючі пристрої (КП) забезпечують необхідні закони управління. Підсилювачі призначені для підсилення управляючої дії.

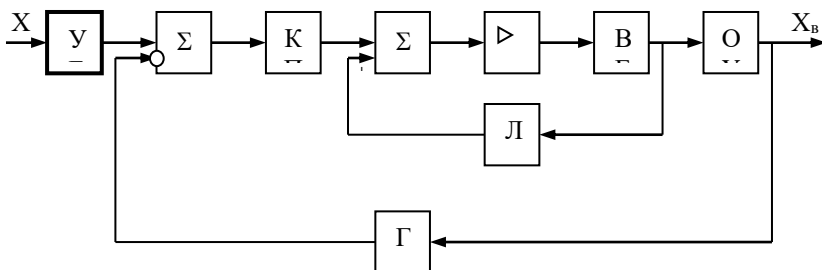


Рисунок 3.10 – Функціональна схема управління:

УЕ – управляючий елемент; Σ – суматор; КП – послідовний коректуючий пристрій; $-\triangleright$ – підсилювач; ВЕ – виконуючий елемент; ОУ – об'єкт управління; Л.З.З. – локальний зворотний зв'язок; Г.З.З. – глобальний зворотний зв'язок. Виконуючі елементи призначені для приведення в дію регулюючих органів об'єкту управління, від положення яких залежать значення керованих величин.

3.2.7 Приклад системи управління за розімкненим циклом

Приклад системи управління за розімкненим циклом на прикладі електромеханічної схеми управління частотою обертання ω двигуна постійного струму) зображено на рис. 3.11.

Об'єктом управління є двигун постійного струму. Вхідна величина – напруга, вихідна величина – кругова частота.

Електродвигун приводить до обертання вал РМ. З валом електродвигуна жорстко зв'язаний ТГ. Електродвигун під'єднаний до генератора постійного струму напругою U , який обертається за допомогою привідного двигуна ПД. Обмотка збудження генератора ввімкнена через потенціометр R на джерело постійної напруги.

Переміщуючи повзунець n реостату R і контролюючи частоту обертання валу ω за показами індикатора, можна керувати частотою обертання валу за заданим законом. Необхідно забезпечити умови від'ємного зворотного зв'язку.

Розімкнений цикл (контур)

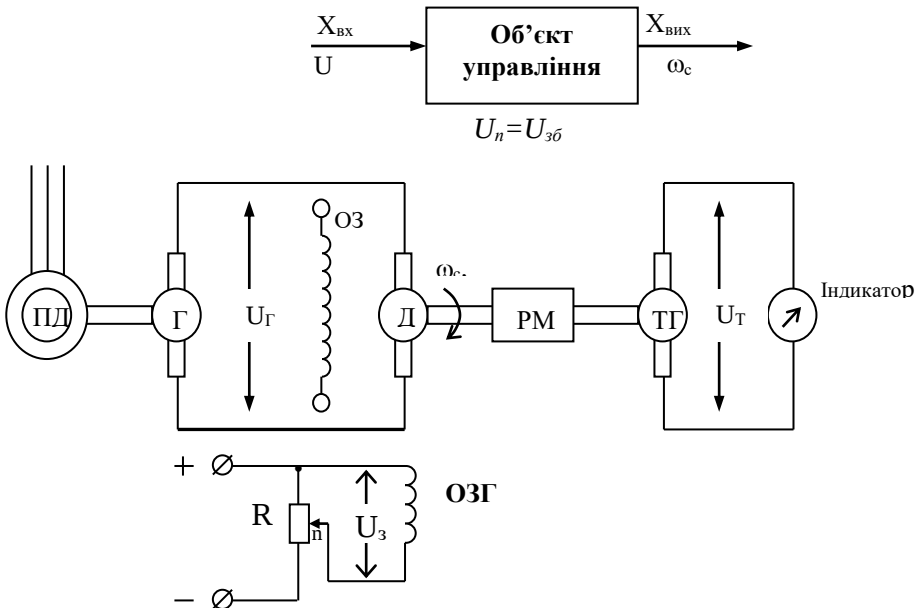


Рисунок 3.11– Системи управління за розімкненим циклом:

ПД – привідний двигун; РМ – робоча машина; ТГ – тахогенератор – перетворює швидкість обертання в напругу; І – індикатор напруги.

Електродвигун приводить до обертання вал РМ. З валом електродвигуна жорстко зв'язаний ТГ.

Електродвигун під'єднаний до генератора постійного струму напругою U , який обертається за допомогою привідного двигуна ПД. Обмотка збудження генератора ввімкнена через потенціометр R на джерело постійної напруги. Переміщуючи повзунець n реостату R і контролюючи частоту обертання валу ω за показами індикатора, можна керувати частотою обертання валу за заданим законом. Необхідно забезпечити умови від'ємного зворотного зв'язку. Приклад системи за замкненим циклом зображено на рис. 3.12.

Замкнутий цикл (контур)

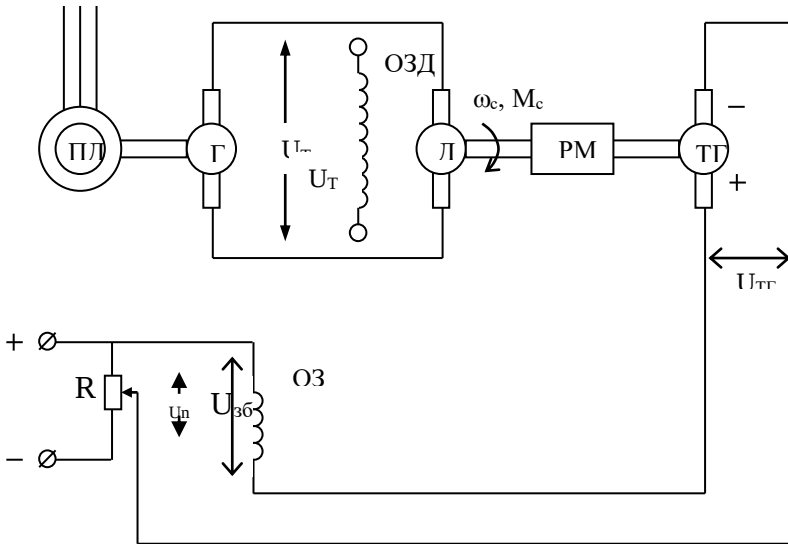


Рисунок 3.12 – Системи за замкненим циклом

$$U_{зб.г.} = U_n - U_{mг.}; \quad X_p = X_{ex} - X_{з.з.} \quad (3.2)$$

Виконання умови 3.2. забезпечує утворення в системі головного від'ємного зворотного зв'язку і можливість регулювання вихідної величини ω . При збільшенні навантаження на валу Д, частота його обертання зменшується, що призводить до зменшення напруги на ТГ і збільшення напруги збудження генератора. Збільшення U_{zb} збільшує частоту обертання валу.



Запитання для самоперевірки

1. Теорія автоматичного управління – це...
2. Що уявляє собою пристрій управління?
3. Алгоритм функціонування – це...
4. В чому різниця автоматичного та автоматизованого управління?
5. Як класифікують автоматизовані системи (за видом процесу)?
6. Що уявляє собою узагальнена модель комп'ютерного управління?
7. Як виглядить загальна схема управління замкненим циклом?
8. Наведіть приклад системи управління за розімкненим циклом.

Розділ 4

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ДИСТАНЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ

Контактори
Електромагнітні пускачі
Електромагнітні реле
Електронне реле

4.1. Контактори

Контактором називається двопозиційний електричний пристрій – призначений для частих вмикань і вимикань силових електричних кіл напругою до 1000 В при нормальних режимах роботи.

Залежно від привода контактів контактори поділяються на: електромагнітні, гідравлічні і пневматичні.

Найпоширенішими є електромагнітні контактори. За родом комутованого струму контактори бувають:

- постійного струму;
- змінного струму;
- постійного/змінного струму.

Електромагнітні контактори, призначені для роботи в колах постійного струму, мають привод від електромагнітів постійного струму. Контактні системи контакторів змінного струму приводяться від електромагнітів постійного або змінного струму.

За кількістю головних кіл контактори можуть бути одно-, дво-, три-, чотири- і п'ятиполюсними.

• Основними технічними даними контакторів є: номінальна напруга;

- номінальний струм головних і допоміжних контактів;
- механічна і комутаційна стійкість проти спрацювання;
- допустима кількість вмикань за годину;
- власний час вмикання і вимикання.

Номінальним струмом контакторів вважають найбільший струм, який можна пропускати через замкнені головні контакти протягом 8 год. без комутацій. При цьому температура різних

частин апарата не повинна перевищувати допустимої. Граничний номінальний струм більшості контакторів дорівнює 630А. Окремі серії виготовляються на струм до 3000 А.

Передбачено також роботу контакторів у таких режимах:

- переривчасто тривалому;
- тривалому;
- повторно-короткочасному і короткочасному.

Крім того, розрізняють режими нормальних комутацій і нечастих комутацій. Останні можуть виникати не часто, наприклад, при коротких замиканнях.

Стійкість електричних апаратів проти спрацювання поділяють на електричну (комутаційну) і механічну.

Механічна стійкість проти спрацювання – визначається кількістю циклів вмикання-вимикання апарата при знеструмленому головному колі без ремонту і заміни його вузлів і деталей. Механічна стійкість сучасних контакторів досягає 20 млн. циклів.

Комутаційна стійкість проти спрацювання – кількість операцій вмикання/вимикання кола із струмом, після якої потрібна заміна контактів.

Гранична комутаційна стійкість сучасних електромагнітних контакторів 3-5 млн. операцій.

Власний час вмикання контактора – це проміжок часу від моменту подачі напруги на котушку електромагніту до замикання магнітопроводу. Через велику індуктивність котушок власний час вмикання контакторів з електромагнітами постійного струму досягає 0,2-0,35 с.

Контактори з електромагнітами змінного струму спрацьовують значно швидше – за 0,03-0,05 с. Власний час вимикання – це час від моменту розмикання кола котушки електромагніту до моменту розмикання контактів апарата. У контакторів з електромагнітами постійного струму цей час дорівнює 0,06-0,23 с. Апарати з електромагнітами змінного струму вимикаються за 0,02-0,03 с.

Контактори складаються з таких основних вузлів: системи головних контактів, дугогасного пристрою, електромагніту і системи допоміжних контактів.

При подачі напруги на котушку електромагніту контактора його якір притягується до нерухомого осердя і приводить в рух траверсу з рухомими контактами.

Внаслідок цього замикаючі контакти замикаються, а розмикаючі – розмикаються. При знеструмленні котушки якір відпадає під дією пружини або власної ваги.

Дугогасний пристрій забезпечує швидке гасіння дуги, чим досягається мале зношення контактів.

Контактори постійного струму в більшості випадків виготовляються однополюсними. Але в окремих серіях на струми до 160 А є апарати з кількома як замикаючими, так і розмикаючими головними контактами.

Контактори змінного струму виготовляються дво-, три-, чотири- і п'ятиполюсними на струми від 100-1000 А.

Найпоширеніші триполюсні контактори, які використовують для керування трифазними споживачами електричного струму.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд однополюсного контактора постійного струму КПВ-600



Рисунок 4.2– Контактор змінного струму Chint NXC-12 220V 50Hz

Магнітопроводи складаються з нерухомого і рухомого осердь, мають Ш-або П-подібну форму і набираються з окремих ізольованих одна від однієї пластин товщиною 0,35; 0,5; 1 мм.

Для гасіння дуги використовують деіонні решітки або камери з вузькими щілинами та послідовні дугогасні котушки. Контактор типу КТ-6000 призначений для вмикання і вимикання приймачів електричної енергії з номінальною напругою до 380 В. Контактори виготовляються на номінальні струми від 80 до 630 А. Конструкція контактора блочна. Блоки електромагніту 4, головних 11 і допоміжних 16 контактів змонтовані на сталій рейці 5. Обертний момент від електромагніту до рухомих контактів передається через ізольований вал 6, який обертається в підшипниках 7.

4.2. Електромагнітні пускачі

Електромагнітний пускач –комутаційний апарат, призначений для вмикання і вимикання трифазних асинхронних електродвигунів при напрузі до 660 В змінного струму частотою 50, 60 Гц. Пускачі виготовляються на номінальні струми головних контактів від 6,3 до 200 А.

Головним апаратом пускача є електромагнітний контактор. Пускач, призначений для нереверсивного керування двигуном, має один контактор, для реверсивного – два, а для пуску двигуна з перемиканням обмоток статора із зірки на трикутник – три.

Крім того, в пускач можуть бути вмонтовані теплове реле або пристрій позисторного захисту, які призначені для захисту двигуна від перевантажень недопустимої тривалості, кнопки «Пуск» і «Стоп», а також сигнальна індикація.

За ступенем захисту від дії навколишнього середовища пускачі виконуються відкритими (IP00), захищеними (IP40) і пиловодозахищеними (IP54). Контактори сучасних пускачів, наприклад, серії ПМЛ, мають прямоходову систему головних і допоміжних контактів місткового типу. Головні і допоміжні контакти мають накладки із срібла або металокераміки. У контакторів з номінальним струмом більше 10 А біля кожного розриву головних контактів розміщені дугогасні решітки, а до 10 А - дугогасні вузькі щілини.



Рисунок 5.5 – Електромагнітний пускач
АСКО ПМ 1-09-10 220В

Пускачі можуть комплектуватися тепловими реле серії РТТ, призначеними для захисту двигунів від перевантажень недопустимої тривалості та при обриві однієї із фаз, або апаратами позисторного захисту типу АЗП чи УВТЗ-позисторного спрацьовують при недопустимому перевищенні температури обмоток статора.

Основними технічними даними пускачів є:

- номінальна напруга,
- номінальний струм головних і допоміжних контактів, механічна і комутаційна стійкість проти спрацювання, допустима кількість вмикань за годину.

Слід розрізняти номінальні і номінальні робочі напруги і струми пускачів. Номінальною напругою пускача вважають напругу мережі, для якої пускач призначений.

Номінальною робочою називають напругу мережі, при якій пускач може працювати. Так, номінальна напруга пускачів серії ПМЛ і ПМА становить 380 В.

Пускачі ж можуть працювати у мережах з напругою 500 і 660 В. При цьому номінальні струми повинні бути зменшені.

Номінальним струмом пускачів є струм, який визначений за умовами нагрівання пускача в основному конструктивному виконанні при роботі в основному номінальному режимі і номінальній напрузі.

Стійкість пускачів проти механічних спрацювань досить висока і становить 5-16 млн циклів при допустимій частоті вмикання 3600 або 2400 за годину. За стійкістю проти комутаційних спрацювань пускачі поділяються на три виконання: А, Б, В.

4.3 Електромагнітні реле

Реле – слабкострумний електричний апарат, призначений для виконання логічних і вимірювальних функцій у ланцюгах управління з струмом до 5 А – має спрощену контактну систему з збільшеним числом контактів, за відсутності дугогасильних пристроїв.

У залежності від виконуваних функцій електричні реле поділяються на логічні і вимірювальні.

Електричне логічне реле призначене для спрацювання і повернення у вихідний стан при зміні вхідної впливаючої величини, не нормованої щодо точності.

Електричне вимірювальне реле призначене спрацьовувати з визначеною точністю при заданому значенні чи значеннях характеристичної величини.

Щоб пояснити принципову різницю між логічним і вимірювальним реле, порівняємо два таких реле, що мають у якості вхідної величини впливу напругу.

Логічне реле призначене для спрацювання чи повернення при дискретній зміні вхідної величини впливу (у нашому прикладі напруга подається на вхід реле чи не подається).

На відміну від логічного обмотка вимірювального реле постійно знаходиться під напругою, стежить за її зміною (вхідна величина виміряється безупинно). Напруга для нього не тільки вхідна впливаюча величина, але і характеристична величина.

Якщо це *максимальне* реле, то воно спрацює, коли напруга зросте до значення уставки за характеристичною величиною (з деякою точністю, забезпечуваною цим реле).

Мінімальне вимірювальне реле спрацює, коли напруга знизиться до значення уставки. Надалі ми будемо мати на увазі максимальні реле.

Характеристична величина вимірювального реле – це електрична величина, нормована у відношенні точності і яка визначає функціональну ознаку реле. Для її утворення необхідна вхідна впливаюча величина електричного вимірювального реле чи кілька вхідних впливаючих величин.

Спрацювання реле – виконання реле функції, для якої воно призначено.

Повернення реле – перехід реле у вихідний стан зі стану, у якому воно знаходилося після спрацювання.

В реле при плавній зміні керуючого (вхідного) параметра до певної наперед заданої величини відбувається стрибкоподібна зміна керованого (вихідного сигналу) параметра.

При цьому хоча б один з цих параметрів повинен бути електричним.

Реле може працювати в трьох режимах:

1) режим повторювача – спрацювання відбувається при стрибкоподібному зміні вихідної величини до її максимального значення;

2) режим інвертора – поетапне зменшення вихідного параметра до мінімального рівня;

3) режим реле з пам'яттю (режим тригера) – при цьому досягнуте після спрацювання або відпускання значення вихідного параметра зберігається і запам'ятовується після зникнення вхідного сигналу.

Конструкція електромагнітного реле перетворює магнітний потік, що створюється прикладеною напругою змінного/постійного струму, механічне зусилля. Завдяки отриманому механічному зусилля, виконується управління контактною групою.

Найбільш поширеною конструкцією є форма виробу, що включає наступні компоненти:

- збуджуючу силу;
- сталевий сердечник;
- опорне шасі;
- контактну групу.

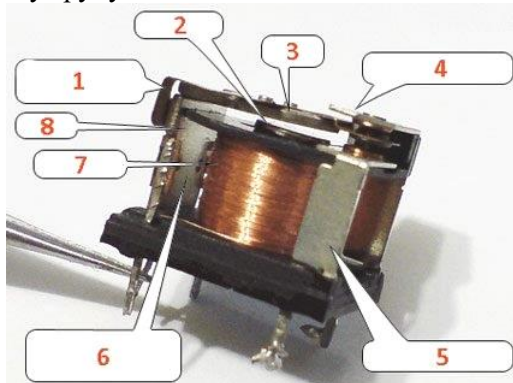


Рисунок 4.4 – Детальний розклад конструкції реле:

- 1 – пружина віджимася; 2 – металевий сердечник; 3 – якір; 4 – контакт нормально закритий; 5 – нормально відкритий контакт; 6 – загальний контакт; 7 – котушка мідного дроту; 8 – коромисло

Сталевий сердечник має фіксовану частину, звану коромислом, і рухому підпружинену деталь, іменовану якорем. По суті, якір доповнює ланцюг магнітного поля, закриваючи повітряний зазор між нерухомою електричної котушкою і рухомий арматурою.

Для електромагнітних реле постійного струму в якості магнітопроводів і сердечників застосовується м'яка електротехнічна сталь, тобто матеріал з великою магнітною проникністю. Тяговою характеристикою реле є електромеханічна характеристика реле $F = f(\delta)$, де F – сила притягання якоря, δ – величина повітряного зазору між якорем і сердечником.

Залежно від потужності контактних груп контакти виготовляють із золота, срібла, платини, вольфраму і т. д. Ці матеріали володіють високою температурою плавлення, механічною міцністю, електропровідністю і малою окислюваністю. Для зменшення іскроутворення на контактах реле застосовують іскрогасні ланцюги, що складаються з ємності і опору, які включаються паралельно контактам реле.

Електромагнітне реле змінного струму за принципом дії аналогічно реле постійного струму. Проте ярмо, якір і сердечник виготовляють лише з листової електротехнічної сталі, для того, щоб за рахунок конструкції зменшити вихрові струми і втрати на гістерезис (перемагнічування сталі).

4.4 Електронне реле

Електронне реле – це тип електронного перемикач, який відкриває або закриває контакти ланцюга за допомогою електронного компонента без будь-якої механічної роботи.

Таймер – один із видів електронного реле.

Переваги електронного реле:

1. Вони вимагають низького технічного обслуговування.
2. Реле має швидкий час відгуку.
3. Вони зменшують навантаження на приладовий трансформатор.

Недоліки електронного реле:

1. Реле має короткий термін служби.



Запитання для самоперевірки

1. Яку роль виконують контактори?
2. Електромагнітні пускачі це...
3. У яких випадках використовують електромагнітні пускачі?
4. Електромагнітні реле. У яких випадках їх використовують?
5. Електронне реле. Переваги та недоліки...

ГЛОСАРІЙ

Аналогова електроніка – формування та обробка безперервних в часі сигналів.

Автотрансформатор – трансформатор, дві або більше обмоток якого мають спільну частину.

Аналого-цифровий перетворювач (АПЦ) – пристрій, за допомогою якого вхідна аналогова величина перетворюється у еквівалентний цифровий двійковий N - розрядний код.

Алгоритм управління – це сукупність настанов, що визначають характер впливів на ОУ з метою забезпечення його алгоритму функціонування.

Асинхронний двигун – це електродвигун змінного струму, робота якого базується за рахунок обертання магнітного поля, що створюється струмом обмоток статора, при цьому дана частота обертання не збігається (асинхронна) з частотою обертання магнітного поля ротора двигуна (від чого і назва).

Біполярний транзистор – напівпровідниковий елемент із трьома електродами, один з яких служить для керування струмом між двома іншими.

Вакуумна електроніка – напрям електроніки, який охоплює питання створення електровакуумних приладів.

Векторна діаграма – сукупність векторів, що зображують декілька синусоїдальних величин однакової частоти в початковий момент часу.

Вітка – частина кола між двома суміжними вузлами, по вітці протікає один струм.

Вимірювальний трансформатор напруги – знижувальний трансформатор, що дає змогу вимірювати напругу в мережах зі значною напругою – за допомогою електричних приладів з відносно невеликими границями вимірювань.

Вимірювальний прилад – це засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірюваної інформації.

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, призначений для формування на своєму виході сигналу, що функціонально зв'язаний із сигналом вимірюваної інформації на

вході у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та збереження.

Варикап – напівпровідниковий діод, в якому використовується залежність ємності від величини зворотного напруги.

Випрямляч – статичний пристрій, призначений для перетворення змінного струму в постійний.

Випрямлення – це перетворення змінного струму у постійний.

Вольт-амперна характеристика – залежність струму, що проходить через елемент від напруги на ньому.

Вузол – точка в якій сходяться не менше трьох струмів (точка розгалуження струмів).

Генератором постійного струму називають обертову електричну машину, яка перетворює механічну енергію в електричну енергію постійного струму.

Діністор – діодний тиристор, що має два виводи.

Двигун – машина, яка перетворює електричну енергію в механічну.

Діод Ганна – тип напівпровідникових діодів для генерації та перетворення коливань у діапазоні НВЧ

Діоди Шоттки – засновані на дії контакту, що випрямляє.

Джерело живлення – елемент електричного кола, в якому зосереджена електрорушійна сила.

Диференціальний опір – відношення приросту напруги на діоді до малого приросту струму, що викликав це збільшення.

Електронний генератор – пристрій, призначений для утворення періодичних коливань електричного струму.

Електрична машина – електромеханічний пристрій для перетворення механічної енергії на електричну чи електричної на механічну, або електричної енергії одного роду чи з одними параметрами на електричну енергію іншого роду або з іншими параметрами.

Електричний резонанс – це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань сили струму в колі при наближенні циклічної частоти зовнішньої змінної ЕРС до частоти власних коливань ω_0 кола.

Електроніка – це галузь фізики та техніки, в якій досліджуються електронні процеси, що пов'язані з утворенням та керуванням руху вільних електронів та/або інших заряджених частинок в різноманітних середовищах (вакуум, тверде тіло, газ, плазма) та на їх границях, а також проблеми і методи розробки електронних приладів різного призначення.

Електротехніка – галузь науки і техніки, пов'язана із застосуванням електричних і магнітних явищ для перетворення енергії.

Еталон (одиниці фізичної величини) – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам вимірювальної техніки.

Ефект Зенера – тунельний пробій *p-n* переходу.

Електроавтоматика – сукупність електричних пристроїв або систем керування технічними процесами, що діє без безпосередньої участі людини.

Ємнісний фільтр – це конденсатор, що вмикається паралельно навантаженню.

Інтегральна мікросха (ІМС) – мікроелектронний виріб, що виконує визначену функцію перетворення, обробки сигналу і (або) накопичування інформації і має високу щільність упакування з'єднаних електрично елементів (або елементів і компонентів) і (або) кристалів, що з точки зору вимог до випробувань, приймання, постачання й експлуатації розглядається як єдине ціле.

Засіб вимірювань (ЗВ) – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань, має нормовані метрологічні характеристики, котрий відтворює та (або) зберігає одиницю фізичної величини, розмір якої приймається сталим в межах визначеної похибки протягом визначеного інтерва

IGBT-транзистор (анг. *Isolated Gate Bipolar Transistor* – біполярний транзистор із ізольованим переходом.

Індуктивний фільтр – дросель, що вмикається послідовно навантаженню.

Інвертор – перетворювач постійного струму в змінний.

Компаратор – електронний пристрій, призначений для порівняння сигналів (напруг).

Комп'ютер – програмно-керований пристрій для обробки інформації.

Лічильник імпульсів – електронний пристрій, призначений для підрахунку імпульсів

Логарифмічний підсилювач – вид електронних підсилювачів, вихідна напруга якого пропорційно логарифму вхідної напруги.

Логічний елемент – електронна схема, що реалізує певну перемикальну функцію. Термін «логічні» прийшов в електроніку з алгебри логіки, що оперує зі змінними величинами і їхніми функціями, що можуть приймати тільки два значення: «істинно» чи «хибно».

Мікропроцесор (МП) – електронний пристрій, який здійснює приймання, оброблення і видачу інформації.

Міра фізичної величини – засіб вимірювальної техніки, призначений для відтворення та зберігання однієї або декількох відомих значень фізичної величини.

Мікропроцесорна техніка – область електроніки, яка на даному етапі найшвидше розвивається.

Мікроконтролер – це спеціалізований мікроелектронний програмований прилад, що призначений для використання у керуючих пристроях, системах передачі даних та системах керування технологічними процесами.

Мультивібратор – релаксаційний автогенератор напруги прямокутної форми.

Міні-ЕОМ (minicomputer) – мала ЕОМ, що має невеликі розміри та вартість. З'явившись наприкінці 1960-х років, міні-ЕОМ мають широкі можливості в розв'язанні задач різноманітних класів.

Напівпровідниковий діод – напівпровідниковий прилад з одним випрямним електричним переходом і двома зовнішніми виводами.

Напівпровідниковий фотодіод – напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від освітленості.

Операційний підсилювач – електронний пристрій, який здатний виконувати математичні операції з електричними сигналами.

Підсилювач – електронний пристрій, якій призначений для підсилення періодичних та постійних за струмом сигналів.

Польовий транзистор (ПТ) – напівпровідниковий прилад, у якому струм створюють основні носії під дією повздовжнього електричного поля.

Потенціал – робота по перенесенню заряду із даної точки в точку з нульовим потенціалом

Регістр – функціональний пристрій, призначений для збереження інформації, а також для перетворення кодів, наприклад, з паралельного в послідовний.

Симістор (симетричний тріодний тиристор) або TRIAC (від англ. TRIAC – triode for alternating current) – напівпровідниковий прилад, є різновидом тиристора, використовується для комутації в ланцюгах змінного струму.

Схема Ларіонова – трифазна мостова схема випрямляча, первинна і вторинна обмотки вмикатися за схемою «зірка/зірка».

Схема Міткевича – однопівперіодна схема випрямляча з нульовим виводом

Стабілізатор напруги – електронний пристрій, призначений для підтримання сталого значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору навантаження (дестабілізуючі чинники).

Світлодіод – напівпровідниковий прилад, що здатен перетворювати електричну енергію безпосередньо у світлову.

Стрілка Пірса – операція 2АБО-НІ.

Темновий опір – це опір фотодіода у відсутність освітлення.

Телеавтоматика: – галузь автоматичної, що охоплює теорію й принципи побудови систем керування із застосуванням методів і засобів телемеханіки та сукупність телемеханічних пристроїв.

Теорія автоматичного управління (ТАУ) – наука, що виявляє загальні закономірності функціонування, що властиві для автоматичних систем різної фізичної природи, і на основі цих закономірностей розробляє принципи побудови

Тиристор – перемикаючий напівпровідниковий прилад, що проводить струм тільки в одному напрямку.

Транзистор (англ. *transfer* – «переносити» і англ. *resistor* – «опір») – напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги.

Трансформатор – статичний електромагнітний апарат, який призначений для перетворення однієї – первинної систем змінного струму, в другу – вторинну систем змінного струму.

Трансформатори струму – знижувальні трансформатори, які призначені для ввімкнення а мережу амперметрів, струмових котушок ватметрів тощо.

Тригер – пристрій з двома стійкими станами, які він може здійснювати стрибком за рахунок вхідного управляючого сигналу.

Тунельний діод – напівпровідниковий елемент електричного кола з нелінійною вольт-амперною характеристикою, на якій існує ділянка з від’ємною диференційною провідністю.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – пристрій за допомогою якого формується вихідний аналоговий сигнал, при дії на його входи сигналу в формі цифрового двійкового коду.

Штрих Шеффера – операція 2І-НЕ.

ОПРАЦЬОВАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. Аналоговая и цифровая электроника / Под. ред. Глудкина. – М.: Горячая Линия-Телеком, 1999. –768 с.
2. Бондаренко В.Г. RC- генераторы синусоидальных колебаний. – М.: Связь, 1976.–208 с.
3. Войцицький А.П. Промислова електроніка: навч. посібник: / А.П. Войцицький. –Житомир: ЖНАЕУ, 2017. – 184с.
4. Гершунский Б.С. Справочник по расчету электронных схем. – К.: Вища школа, 1983. – 186с.
5. Електроніка і мікросхемо техніка: підручник /А.П. Войцицький, М.А. Войцицький / Вид. 2-ге, виправ. / Житомир: ЖНАЕУ. – Херсон: «Олді Плюс», 2018. 300с.
6. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справ. /Под. ред. Г.С. Найвельта. –М.: Радио и связь, 1986. –576 с.
7. Токхейм Р. Основы цифровой электроники: Пер.с англ. – М.: Мир, 1993. –392 с.
8. Рицар Б.І. Цифрова техніка. -К.: НМК ВО, 1991. –372с.
9. Шило В. Л. Популярныe цифровые микросхемы: – М.: Радио и связь, 1990.-358 с.
10. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини: підручник. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
11. Каргополова Н.П. Теорія електричних і магнітних кіл. – Житомир: ЖІТІ, 1999. – 239 с.
12. Корнийчук В.И., Тарасенко В.П. Вычислительные устройства на микросхемах. – К.: Техника, 1988. –351 с.
13. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. – К.: Вища школа, 1992. – 439 с.
14. Петренко І.А. Основы электротехники та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання: у 2 ч. – Ч.1: Основы электротехники. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с. Ч.2: 4. Основы електроніки. – К.:Університет «Україна», 2006.–307 с.

15. Скаржепа В.А., Луценко А.И. Электроника и микросхемотехника / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Вища шк., 1989. – 431 с.
16. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2 т.:
17. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. –367 с.
18. Войцицький А.П., Нездвєцька І.В. Контрольно-вимірні прилади з основами метрології: навч. посіб. – Житомир: ЖНАЕУ, 2015. – 344с.
19. Сергеева І.І., Мазулевская А.А., Тарасова Н.В. Информатика: підручник. - М.: ВД «Форум»: ИНФРА - М, 2007.
20. Малинівський С.М. Загальна електротехніка. – Львів: Видавництво Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 594 с.
21. Мандзій Б.А., Желяк Р.І. Основи аналогової мікросхемотехніки. - Львів: Тезаурус, 1993. –186с.
22. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування . – Львів: Магнолія
23. Севин Л. Полевые транзисторы: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1988. – 184 с.
24. Самофалов К.Г., Виктор О.В., Кузник А.К. Микропроцессоры. – К.: Техніка, 1986. –278 с.
25. Костіков В.Г., Парфьонов О.М., Шахно В.А. Джерела електроживлення електронних засобів. Схемотехніка та конструювання: Підручник для вузів. - 2. - М.: Гаряча лінія - Телеком, 2001. - 344 с.
26. Березін О.К.,Костіков В.Г., Шахно В.А. Джерела електроживлення радіоелектронної апаратури. - М.: Три Л, 2000. – 400 с.
27. Розрахунок і оптимізація тороїдальних трансформаторів. С.В.Котенев, А.Н.Евсеев. - М.: Телеком, 2011. - 287 с

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ВСТУП	5
СПИСОК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	9
Частина I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА	10
Розділ I. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ	10
1.1 Загальні відомості	10
1.2 Електричні кола на постійному струму та їх основні елементи	12
1.3 Закон Ома	16
1.4 Закони Кірхгофа	18
1.5 Режим роботи електричного кола. Потужність постійного електричного струму. Закон Джоуля-Ленца	20
Застосування законів Ома та Кірхгофа для розрахунків струмів	22
1.6.1 Узагальнений метод	22
1.6.2 Метод контурних струмів	24
1.6.3 Метод двох вузлів	25
Розділ 2. ОДНОФАЗНИЙ ЗМІННИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА НА ЗМІННОМУ СТРУМІ	27
2.1 Загальні уявлення	27
2.2 Значення синусоїдальних струмів	28
2.3 Векторний метод зображення синусоїдальних величин	29
2.4 Зображення синусоїдних величин комплексними числами	30
2.5 Особливості кіл змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним опором	32
2.6 Розрахунок кіл синусоїдного струму	33
2.7 Трифазні кола змінного струму. Загальні відомості	39
2.7.1 Симетричні режими роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка/зірка»	43
2.7.2 Визначення потужності при симетричному та несиметричному режимах роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка-трикутник»	46
2.7.3 Симетричні режими роботи трифазних кіл у разі їх сполучення за схемами «зірка-трикутник»	46
2.8 Резонансні явища в електричних колах	48
2.9. Кола періодичного несинусоїдного струму	51

2.9.1 Загальні відомості	51
2.9.2 Розкладання періодичних несинусоїдних функцій у тригонометричний ряд Фур'є	
2.2.10 Діючі та середні значення несинусоїдних ЕРС, напруг та струмів	53
Розділ 3. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ. ТРАНСФОРМАТОРИ	55
3.1 Однофазний трансформатор. Загальні уявлення	55
3.1.1 Конструкція однофазних трансформаторів	56
3.1.2 Принцип роботи трансформатора	57
3.1.3 Спрощений розрахунок силових трансформаторів	59
3.1.4 Робота трансформатора під навантаженням. ККД трансформатора	61
3.1.5 Дослідження холостого ходу та короткого замикання	63
3.2 Трифазні трансформатори	66
3.2.1 Тристержеві трифазні трансформатори	66
3.2.2 З'єднання обмоток трансформатора	67
3.3 Автотрансформатори	68
3.3.1. Класифікація автотрансформаторів	68
3.3.2. Розрахунок автотрансформаторів	70
3.4 Вимірювальні трансформатори	71
3.4.1 Вимірювальний трансформатор напруги	72
3.4.2 Трансформатори струму	74
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	77
4.1 Електрична машина. Загальні відомості	77
4.1.1 Класифікація за призначенням	78
4.1.2. Класифікація за родом струму і принципом дії	79
4.1.3 Класифікація за потужністю	81
4.1.4. Класифікація за частотою обертання	82
4.2. Електричні машини постійного струму	82
4.2.1. Двигуни постійного струму	83
4.2.2.1 Класифікація двигунів постійного струму за способом збудження	86
4.2.2.2 Пуск двигунів	88
4.2.2.3 Технічні дані двигунів	89
4.2.2.4 ККД двигунів постійного струму	90
4.2.3 Генератори постійного струму	91
4.2.3.1 Основні характеристики двигунів постійного струму	95
4.2.3.2 Основні характеристики генераторів постійного	96

струму	
4.3. Електричні машини змінного струму	98
4.3.1. Однофазний асинхронний двигун	100
4.3.2. Трифазові асинхронні машини	103
4.3.2.1 Втрати і коефіцієнт корисної дії асинхронного	106
двигуна	
4.3.2.2. Електромагнітний момент асинхронного двигуна	108
4.3.2.3 Регулювання швидкості обертання асинхронного	110
двигуна	
4.3.2.4. Типи асинхронних двигунів	111
4.4 Синхронні машини	111
4.4.1 Принцип дії синхронних машин	112
4.4.2 Типи синхронних машин	115
4.5 Електричні машини спецпризначення	116
4.5.1 Крокові двигуни	116
4.5.2 Мотор генератори	121
4.5.3 Сельсини	122
4.5.4 Обертовий трансформатор	123
4.5.5 Тахометри	125
Частина 2. ЕЛЕКТРОНІКА	128
Розділ 1. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА НА ОСНОВІ	128
НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ МАТЕРІАЛІВ	
1.1 Загальні відомості про напівпровідники	128
1.2 Напівпровідникові діоди	132
1.3 Фотодіоди, світлодіоди	136
1.4 SMD діоди	138
2.2. Транзистори	140
2.2.1 Біполярні транзистори	140
2.2.2. Польові транзистори	143
2.2.3 СІТ-транзистори	147
2.2.4 Транзистори БТІЗ	148
2.2.5 SMD транзистори	149
3.1 Тиристори	150
3.3.1. Тріністор	151
3.3.2 Симістори	152
3.3.3 Фототиристори та опотиристори	153
Розділ 2. ПІДСИЛЮВАЧІ ТА ГЕНЕРАТОРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ	156

СИГНАЛІВ	
2.1. Загальні уявлення	156
2.2. Класифікація підсилювачів електричних сигналів	157
2.2.1. Підсилювач електричних сигналів змінного струму на біполярних транзисторах	157
2.2.2. Каскади підсилення на польових транзисторах	160
2.2.3. Підсилювачі потужності	161
2.2.4. Багатокаскадні підсилювачі	162
2.3 Операційні підсилювачі	163
2.4 Електронні генератори. Загальні відомості	169
2.4.1 Принцип отримання незатухаючих гармонійних коливань	170
2.4.2 LC-автогенератори	171
2.4.3 RC-автогенератори	173
Розділ 3. ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ	175
3.1 Загальні відомості	175
3.2 Випрямлячі	176
3.2.1 Однонапівперіодний некерований випрямляч	176
3.2.2 Двонапівперіодні випрямлячі	178
3.2.3 Трифазні випрямлячі	181
3.3 Згладжувальні фільтри	183
3.4 Стабілізатори	188
3.4.1 Параметричний стабілізатор напруги	189
3.4.2 Компенсаційні стабілізатори напруги	190
3.4.3 Мікросхемні (інтегральні) стабілізатори напруги	191
3.5 Імпульсні стабілізатори напруги	192
3.5.1 Ключовий імпульсний стабілізатор	192
3.5.2 Ключовий стабілізатор з ШІМ	193
3.6 Керовані випрямлячі	195
3.7 Інвертори	196
Розділ 4. ЦИФРОВА ЕЛЕКТРОНІКА	199
4.1 Загальні відомості про інтегральні мікросхеми	199
4.1.1 Класифікація ІМС	200
4.1.2 Функціональні напрямки ІМС	201
4.2 Логічні елементи.	203
4.2.1 Транзисторний ключ	204
4.2.2 Різновид логічних елементів	206
Розділ 5. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	209

5.1. Загальні уявлення	209
5.1.1 Міра фізичної величини	209
5.1.2 Еталони одиниць фізичної величини	211
5.2 Вимірювальні прилади. Загальні уявлення	212
5.3 Вимірювальні перетворювачі	214
5.3.1 Параметричні перетворювачі	216
5.3.2 Генераторні перетворювачі	219
Частина 3. ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ АВТОМАТИКИ	223
Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО АВТОМАТИКУ ТА АВТОМАТИЗАЦІЮ	223
1.1 Основні поняття та терміни	223
1.2 Основні накреслення автоматичного керування	224
1.3 Засоби автоматизації	226
1.4 Переваги та вади автоматизації	227
Розділ 2. СИСТЕМИ АВТОМАТИКИ. ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ	229
2.1. Класифікація систем автоматики	229
2.2 Основи управління. Загальні уявлення	230
2.3 Режими роботи елементів автоматики	230
2.4 Класифікаційні ознаки за призначенням елементів автоматики	232
2.4.1 Класифікація за фізичним принципом дії	232
2.4.2 Класифікація по виконуваних функціях	234
Розділ 3. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ТЕОРІЮ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ	237
3.1 Основні поняття та терміни	237
3.2 Основи управління	238
3.2.1 Класифікація автоматизованих систем за видом процесу	240
3.2.2 Узагальнена модель комп'ютерного управління	242
3.2.3 Об'єкти і процеси управління. Додатний і від'ємний зворотні зв'язки	244
3.2.4 Властивості процесів, котрі ускладнюють управління	244
3.2.5 Загальна схема управління за замкненим циклом	246
3.2.6 Функціональна схема управління	246
3.2.7 Приклад системи управління за розімкненим циклом	246
Розділ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ДИСТАНЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ	250

4.1 Контактори	250
4.2 Електромагнітні пускачі	253
4.3 Електромагнітні реле	255
4.4 Електронне реле	258
ГЛОСАРІЙ	260
ОПРАЦЬОВАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА	266
ЗМІСТ	268

Наукове видання

Доцент

Анатолій Павлович Войцицький

Викладач вищої категорії

Геннадій Степанович Логвінов

Викладач першої категорії

Богдан Олександрович Антипчук

Підручник

Оригінал макет – Антипчук Б. О.

Дизайн обкладинки – Войцицький А.П.

Надруковано з оригінал-макета авторів
Підписано до друк . Формат 60х90/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Друк різнографічний.
Ум. друк. арк. 15,2. Наклад 300. Зам. №

Видавництво Поліський національний
університету, 2023.



Войцицький А.П.



Антипчук Б.О.



Логвінов Г.С.



**Житомирський агротехнічний коледж є центром
освіти, науки та культури в регіоні, входить до першої
п'ятірки найкращих вищих навчальних закладів
України аграрного профілю**