



**С.М.Єсаулов, О.Ф.Бабічева  
Р.В.Воронов**

**СУЧАСНІ АВТОМАТИЗОВАНІ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ  
ТА ПРОЕКТУВАННЯ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ  
ПРІСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**



С.М. Єсаулов, О.Ф. Бабічева, Р.В. Воронов

# СУЧАСНІ АВТОМАТИЗОВАНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ



## КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,  
освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації та  
електропривод»)*

Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2020

**Єсаулов С. М.** Сучасні автоматизовані електромеханічні системи та проектування електромеханічних пристроїв і систем: конспект лекцій для студентів 3–4 курсів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» і 2 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, Р. В. Воронов : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 140 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. С. М. Єсаулов,  
канд. техн. наук, доц. О. Ф. Бабічева,  
асист. Р. В. Воронов

Рецензент

**А. К. Бабіченко**, кандидат технічних наук, професор (Харківський національний технічний університет «ХПІ»)

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,  
протокол № 2 від 03.09.2019.*

© С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, Р. В. Воронов 2020  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020

## ЗМІСТ

Стор.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	9
1 ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ І ПРИСТРОЇВ.....	10
1.1 Електромеханічні пристрої у реальних системах .....	10
1.2 Структура і конструкція робота.....	14
1.2.1 Робочі органи робота.....	16
1.2.2 Ланки .....	16
1.2.3 Маніпулятори.....	17
1.2.4 Керування рухом .....	18
Контрольні питання .....	20
2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ РЕАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	21
2.1 Узагальнена структура .....	21
2.2 Різновиди електромеханічних систем та основні принципи їх побудови.....	23
2.2.1 Електромеханічні системи позиційного типу .....	26
2.2.2 Електромеханічні системи постійної швидкості .....	26
2.2.3 Електромеханічні системи змінної швидкості.....	27
2.2.4 Електромеханічні системи слідкуючого типу.....	27
Контрольні питання .....	29
3 ПРИЗНАЧЕННЯ І ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ .....	30
3.1 Узагальнена структура .....	30
3.2 Традиційні побудови .....	33
3.3 Дискретні електромехатронні перетворювачі.....	37
Контрольні питання .....	42

4 ВИКОНАВЧІ ЕЛЕМЕНТИ .....	42
4.1 Різновиди виконавчих елементів .....	42
4.2 Двофазні індукційні двигуни .....	43
4.3 Двигуни постійного струму з незалежним збудженням .....	47
4.4 Крокові електродвигуни .....	49
4.5 Вентильні двигуни .....	54
Контрольні питання .....	60
5 ВИМІРЮВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ .....	61
5.1 Вимірювальні елементи з обмеженим діапазоном кутового переміщення .....	61
5.2 Сінусно-косінусні обертаючі трансформатори .....	67
5.3 Модифікація обертаючих трансформаторів .....	71
5.4 Лінійні обертаючі трансформатори .....	73
5.5 Сельсини .....	74
5.6 Потенціометричні датчики .....	77
5.7 Ємнісні перетворювачі .....	79
5.8 Тахогенератори .....	81
Контрольні питання .....	90
6 ЕЛЕКТРОННІ КОМУТАТОРИ .....	91
6.1 Основні вимоги і склад .....	91
6.2 Монорежимні транзисторні електронні комутатори .....	92
6.3 Монорежимні розподільники на ІМС .....	98
6.4 Багаторежимні електронні комутатори крокових електродвигунів .....	100
6.5 Полірежимні електронні комутатори крокових та вентильних електродвигунів .....	102
Контрольні питання .....	105

7 ПІДСИЛЮВАЛЬНО-ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ЕМС.....	106
7.1 Вихідні дані для проектування підсилювачів .....	106
7.2 Напівпровідникові підсилювачі .....	107
7.3 Підсилювачі постійного струму.....	112
7.4 Тиристорні перетворювачі .....	114
7.5 Модулятори .....	115
7.6 Демодулятори.....	118
Контрольні питання .....	121
8 СТРУКТУРНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ РЕЛЕЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	122
8.1 Дискретний електропривод з електродвигуном постійного струму .....	122
8.2 Електромехатронний перетворювач з електродвигунами. Базові структури.....	129
8.3 Електромехатронний перетворювач на основі вентильних електродвигунів .....	133
Контрольні питання .....	137
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	139

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

**АІМ** – амплітудно-імпульсна модуляція  
**АЦП** – аналого-цифровий перетворювач  
**БДПС** – безконтактний двигун постійного струму  
**БЕК** – багаторежимний електронний комутатор  
**БЗЗ** – блок зворотного зв'язку  
**БЗП** – блок завдання програми  
**БФКВ** – блок формування керуючих впливів  
**ВЕД** – вентильний електродвигун  
**ВМ** – виконавчий механізм  
**ВП** – виконавчий пристрій  
**ГІС** – гібридних інтегральних мікросхем  
**ГВС** – гнучкі виробничі системи  
**ГТІ** – генератор тактових імпульсів  
**ДЕП** – дискретні електроприводи  
**ДМ** – діодна матриця  
**ДПР** – датчик положення ротора  
**ДПРО** – датчик положення регулюючого органу  
**ДСП і ЗА** – Державна Система Приладів і Засобів Автоматизації  
**ДШР** – датчик швидкості ротора  
**ЕД** – електродвигун  
**ЕДПС** – електродвигун постійного струму  
**ЕК** – електронним комутатором  
**ЕМТП** – електромехатронний перетворювач  
**ЕМС** – електромеханічна система  
**ЕОМ** – електронна обчислювальна машина  
**ІБ** – інтерфейсний блок  
**ІС** – інформаційно-вимірювальну систему  
**ІСМ** – інформаційно-силовий модуль

**ІМС** – інтегральних мікросхемах  
**ЗЗЗ** – загальний зворотній зв'язок  
**ЗП** – задавальний пристрій  
**КЕД** – кроковий електродвигун  
**КМ** – конденсаторна матриця  
**КОМ** – керувальна обчислювальна машина  
**КО** – керований об'єкт  
**КП** – комутуючий пристрій  
**ЛКД** – лінійний кроковий двигун  
**МЗЗ** – місцевий зворотній зв'язок  
**МРС** – магніторухома сила  
**ОК** – об'єкт керування  
**ОТ** – обертаючий трансформатор  
**ПАК** – перетворювач аналог-код  
**ПЕК** – полірежимний електронний комутатор  
**ПЗЗ** – позиційний (головний) зворотний зв'язок  
**ПКН** – перетворювач код-напруга  
**ПМ** – передавальний механізм  
**ПП** – підсилювача потужності  
**ППП** – підсилювально-перетворюючий пристрій  
**ППС** – підсилювачами постійного струму  
**ПР** – промислові роботи  
**ПРК** – перетворювач кута  
**ПрП** – пристрій порівняння  
**ПРШ** – перетворювач швидкості  
**ПТР** – плечо триггеру  
**ПФІ** – перетворювач форми інформації  
**РГС** – регулятором струму  
**РГШ** – регулятор швидкості  
**РІ** – розподільники імпульсів



**РМ** – резистивна матриця  
**РО** – регулюючий орган  
**СКОМ** – спеціалізована керуюча обчислювальна машина  
**СКОТ** – синусно-косинусний обертовий трансформатор  
**СП** – сигнальний процесор  
**ТМ** – транзисторна матриця  
**ТГ** – тахогенератор  
**ТКО** – температурний коефіцієнт опору  
**ФІМ** – фазо-імпульсна модуляція  
**ЦА** – цифровим акселерометром  
**ЦАП** – цифро-аналоговий перетворювач  
**ЦАСП** – цифро-аналогова система позиціонування  
**ЦОМ** – цифрова обчислювальна машина  
**ЦП** – цифровий процесор  
**ЦСП** – цифрова система позиціонування  
**ЦТ** – цифровий тахометр  
**ЧаІМ** – часово-імпульсна модуляція  
**ЧІМ** – частотно-імпульсна модуляція  
**ЧПК** – числове програмне керування  
**ШІМ** – широтно-імпульсна модуляція  
**ШПІ** – широтно-імпульсний перетворювач напруги

## ВСТУП

Дисципліна «**СУЧАСНІ АВТОМАТИЗОВАНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ**» належить до загальних дисциплін і служить для формування знань і умінь в області основних методів побудови функціонування і розробки електромеханічних пристроїв і їх основних компонентів, створення бази для вивчення інших загальнотехнічних і спеціальних дисциплін.

Після вивчення дисципліни студенти повинні знати і вміти використовувати:

- 1) принципи побудови електромеханічних систем (далі – ЕМС);
- 2) класифікацію ЕМС, їх моделі та основні характеристики;
- 3) методи аналізу й синтезу ЕМС;
- 4) структурні і функціональні схеми керованих електроприводів, силові та інформаційні елементи електроприводів;
- 5) характеристики електроприводів;
- 6) засоби обчислювальної техніки і чисельні методи для вирішення задач аналізу і синтезу ЕМС.

# **1 ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ І ПРИСТРОЇВ**

## **1.1 Електромеханічні пристрої у реальних системах**

Переміщення у просторі є суттєвою частиною більшості виробничих процесів, а найбільш типовим прикладом автоматичного керування переміщенням є промислові роботи (далі – ПР) і гнучкі виробничі системи (далі – ГВС).

В даний час відносно прості моделі ПР поступилися місцем більш складним 6-ступеневим маніпуляторам із шарнірною кінематичною схемою, з двома руками або більше. Швидкості їх роботи постійно збільшуються, в той час як похибки позиціонування зменшуються.

Одними з головних механізмів, що визначають продуктивність і точність маніпуляторів ПР, є системи позиціонування, що забезпечують перетворення електричних сигналів у переміщення. Якщо перетворення інформації здійснюється цифровим пристроєм, то таке перетворення виконується цифровою системою позиціонування (далі – ЦСП). Відносно керуючої електронної обчислювальної машини (далі – ЕОМ) ЦСП виконує функції периферійного пристрою, що здійснює перетворення інформації у механічне переміщення.

В основі організації програмних ПР лежать елементи ієрархії, тобто способи організації системи, коли вона представляється у вигляді багаторівневого набору взаємодіючих підсистем (рівнів ієрархії). Джерелом команд верхнього рівня ієрархії є людина-оператор; як нижній рівень ієрархії можна виділити ЦСП, що забезпечує адекватне відпрацювання керуючих сигналів, які надходять до неї від вищого рівня.

Цифро-аналогова система позиціонування (далі – ЦАСП) є самостійною закінченою підсистемою, яка гарантує вище стоячому рівню, виконання команд, які нею генеруються.

Наступний рівень ієрархії служить для обчислення і команд оператора. Реалізація такої найпростішої дворівневої структури (рівень електромехатронного перетворювача (далі – ЕМТП) і рівень обчислення керування або, як його називають, тактичний рівень, може бути найрізноманітнішою.

Залежно від розподілу функцій між ЕОМ і ЦСП розрізняють автономний і суміщений варіанти систем побудови. В автономному варіанті побудови ЕОМ не входить у контур позиціонування і служить тільки джерелом цифрової інформації. Реалізується пряме перетворення з локальними зворотними зв'язками в його проміжних точках. У суміщеному варіанті ЕОМ включається у контур позиціонування і не тільки виконує функції пристрою, що задає, але і здійснює порівняння вхідної та вихідної інформацій, виробляє сигнали корекції, формує алгоритми керування.

Незалежно від варіанту побудови, ЦСП складається з двох основних пристроїв: вхідного перетворювача інформації та ЕМТП електричного сигналу в кутове або лінійне переміщення.

Роботи, які оснащені гнучко керованими ЦСП, можуть найбільш повноцінно відтворювати працю рук людини в самих її різновидах. Створення електромеханічних роботів в даний час економічно виправдано і успішно реалізовується завдяки вдосконаленню різних датчиків, помітному прогресу в створенні виконавчих електродвигунів та істотному поліпшенні якості керування ними через засоби мікропроцесорної техніки.

Завдяки можливості незалежного регулювання кутового положення шести ланок функціонування цієї механічної руки, можна відтворити рух руки людини. Вона здатна здійснювати більш складні рухи, наприклад згинати свій «лікоть» назад.

Більшість розглянутих у посібнику варіантів побудов ЦСП передбачає перетворення цифрової інформації у кутові переміщення. Це пов'язано з тим, що поступальні переміщення при перетворенні, в переважній більшості випадків, можуть бути трансформовані в кутові переміщення.

Слід зазначити, що підхід до перетворення цифрової інформації у поступальні переміщення через кутові, не виключає використання методів прямого перетворення.

Особливий інтерес у цьому плані представляють однокоординатні й багатокоординтні лінійні кроковий двигуни (далі – ЛКД).

Помітною властивістю ЛКД виявилася можливість побудови на їх основі ЕМТП з суміщенням рухів за різними координатами. Області застосування двокоординатного ЛКД з плоским робочим зазором та аеростатичними опорами вкрай різноманітні. Заміна ними традиційних двокоординатних систем точного позиціонування, вдосконалило цю область техніки, так як при збереженні колишньої точності позиціонування, що досягає 10 мкм в робочому полі  $2 \times 3$  м, швидкодія ЦСП збільшується на порядок.

Обробні центри, маніпуляційні роботи, автоматизовані виробничі і складальні лінії, верстати з програмним керуванням, автоматизоване і роботизоване випробувальне обладнання та стенди для натурного і напівнатурного моделювання представляють далеко не повний перелік комплексів, де необхідно перетворення інформації цифрових ЕОМ у переміщення. Використовувані при цьому ЦСП характеризуються поєднанням функцій перетворювача форми інформації (далі – ПФІ) з одночасним перетворенням електричної енергії у механічну енергію переміщення робочого органу. Ця властивість є основною і визначає всі інші показники системи і ЕМТП.

Наявність електромеханічного перетворювача енергії у прямому контурі системи зменшує її швидкодію у порівнянні з швидкодією системи з електронними цифро-аналоговими перетворювачами (далі – ЦАП). Якщо швидкодія сучасних інтегральних ЦАП визначається мікросекундами, то

швидкодія ЦСП відповідає мілісекундному діапазону. У зв'язку з тим, що швидкодія ЦСП в значній мірі визначає продуктивність технологічного устаткування, то завдання оптимізації часу електромеханічного перетворення стає все більш актуальним.

Важливим фактором, що визначає ефективність ЦСП, є похибка перетворення, яка практично визначає точність виконання технологічної операції.

У цій частині вимоги до ЦСП перевищують аналогічні вимоги до електронних ЦАП. Така особливість значною мірою визначає побудову всього тракту ЦСП, вибір цифрових і аналогових електронних перетворювальних пристроїв, підсилювачів і електромеханічних виконавчих та вимірювальних елементів ЕМТП. До ЦСП, які використовуються в ПР, зазвичай пред'являється комплекс жорстких і багато у чому суперечливих вимог: висока швидкодія у поєднанні з плавністю руху; відсутність перерегулювання; висока точність перетворення цифрової інформації у переміщення; стійкість у широкому діапазоні зміни навантаження; мінімальна маса і габаритні розміри виконавчих і вимірювальних елементів; підвищена надійність у роботі; зручність в експлуатації; висока технологічність і максимальна уніфікація вузлів і елементів.

Цифро-аналогова система позиціонування повинна забезпечувати переміщення робочого органу ПР з точки у точку за мінімальний час із заданою якістю руху. Вимоги до якості руху (обмеження по швидкості й прискоренню, відсутність перерегулювання, точність позиціонування) визначаються насамперед технологічним процесом, але можуть бути і наслідком обмежених можливостей ЕМТП або ЦСП загалом.

Загальними вимогами, що пред'являються до ЦСП всіх ПР, є вимоги до точності, швидкодії і виду перехідного процесу. Виконання цих вимог, поряд із витратами на виготовлення і експлуатацію ПР, визначає ефективність їх використання.



Найбільша точність необхідна на операціях складання, де в окремих випадках, допустима похибка позиціонування становить одиниці кутових секунд. При виконанні транспортно-орієнтуючих операцій, похибки ЕМТП повинні складати одиниці кутових хвилин. Транспортні ПР повинні володіти підвищеною швидкістю.

У більшості існуючих ПР зазвичай використовуються спрощені варіанти їх побудови, допустимі для вирішення того кола завдань, на яке розрахований даний робот. Це в першу чергу відноситься до циклового керування, де необхідна точність і плавність рухів досягається механічними засобами-упорами і амортизаторами. Більш складні рухи, що вимагають поєднання високої продуктивності, точності і плавності, а також й малі переміщення, допускають використання високоякісної ЦСП з прецизійними перетворювачами положення і пристроїв керування з досить широкими логіко-обчислювальними можливостями.

Реалізація більш складних алгоритмів керування у більшості випадків пов'язана зі збільшенням вартості ЦСП і зниженням надійності ПР. У зв'язку з цим пошуки рішень, що дозволяють здійснити формування більш досконалих алгоритмів, без істотного ускладнення ЦСП, є актуальними.

Розглянемо ПР як електромеханічний пристрій.

## **1.2 Структура і конструкція робота**

Під *робочим місцем у промисловості* розуміють середовище, в якому виробляються дії і яке складається з різних предметів: рухомих або нерухомих, жорстких або деформуючих, вільних або пов'язаних між собою. Це доводиться враховувати при вирішенні різних завдань, кожне з яких складається із сукупності безперервних або переривчастих дій, виконуваних для отримання необхідної зміни середовища.

В широкому розумінні робот може бути визначений як технічна система, здатна замінити людину або допомагати їй у виконанні різних завдань. При

визначенні поняття робота доводиться вдаватися до наступних понять: робоче середовище; джерело енергії, яке необхідне для забезпечення функціонування робота; джерело інформації, яке потрібне для опису поставленого людиною-оператором завдання.

Необхідно мати на увазі, що робот виконує дві функції, які реалізуються різними пристроями: інформаційними та виконавчими.

Інформаційні пристрої виробляють команди в залежності від результатів обробки інформації, що надходять у трьох видах: цілі виконуваного завдання, вимірювань поточного стану виконавчого пристрою і спостережень над робочим середовищем, що знаходиться у безпосередній близькості або на відстані від робота (рис. 1.1).

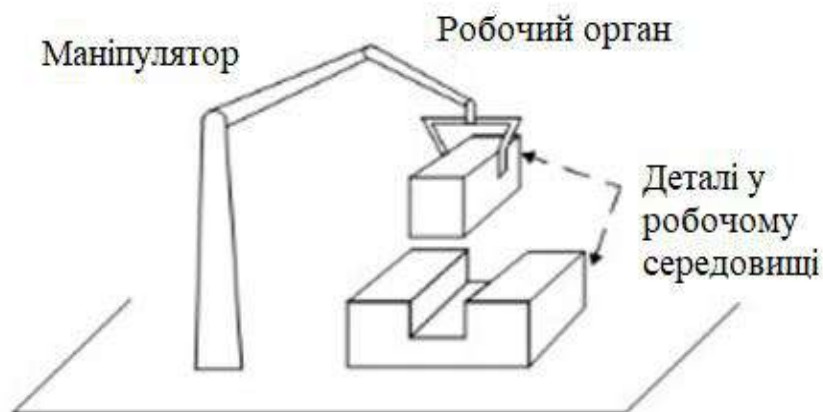


Рисунок 1.1 – Організація роботи робота

Виконавчі пристрої впливають на робоче середовище відповідно до команд, шляхом перетворення і витрачання одержуваної ззовні енергії.

Визначимо основні види робіт, які повинен виконувати робот:

- виготовлення предметів (в металообробній, автомобільній та інших галузях промисловості);
- будівельні роботи (спорудження будівель, шляхопроводів тощо);
- видобуток і переробка сировини (шахти, кар'єри, цементні заводи);
- сільськогосподарські і лісові роботи;
- види робіт, які небезпечні для життя людини;
- робота в медичних установах.

Потім слід визначити основні характеристики предметів, з якими робот взаємодіє. До них можна віднести: форму; об'єм; масу, температуру; габарити; стан поверхні; внутрішню структуру; зміна розмірів; обмеження рухів, пов'язане з можливістю пошкодження предмета тощо.

Можливості робота у значній мірі визначаються взаємодією його робочого органу із зовнішнім середовищем. Робочий орган відіграє основну роль, так як впливає на зовнішні предмети і тому він визначає основні вимоги до всіх інших конструктивних елементів робота.

### 1.2.1 Робочі органи робота

*Робочими органами робота* можуть бути різноманітні інструменти: кліщі, присоски (захвати), сопла, горілки (в дуговому зварюванні) і т. д. При конструюванні робочого органу всі операції ретельно аналізуються. Не вдаючись до подробиць, які розглянуті у спеціальній літературі, відзначимо, що робочий орган має такі властивості:

- є складною системою, яку нечасто можна представити у вигляді єдиного елемента, який не піддається деформації;
- відноситься до типу пристроїв, що складаються з декількох приводів;
- часто містить чутливі датчики, що дозволяють забезпечити його адаптацію до конкретних умов завдання.

Слід зазначити, що поряд з монофункціональними захватами іноді зустрічаються мультифункціональні (подвійні кліщі, чотирьох операційні головки і т. д.).

### 1.2.2 Ланки

При вирішенні виробничих завдань, робочий орган використовується для виконання заданих рухів. Ланки маніпулятора утворюють механічну систему із змінною геометрією, пов'язану з корпусом робота і, яка дозволяє за допомогою

рухів, обмежених амплітудою, переміщати і орієнтувати робочий орган. Рухи ланок маніпулятора відбуваються відносно нерухомої платформи робота (рис. 1.2).

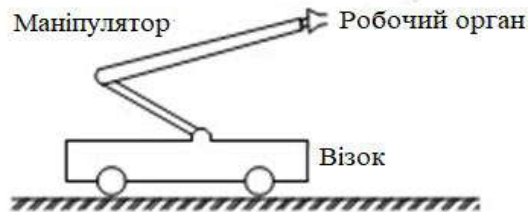


Рисунок 1.2 – Робот на рухомій платформі

Робот на рухомій платформі – є вільна механічна система, здатна переміщатися (автовізок, підводний робот і т. д.).

### 1.2.3 Маніпулятори

*Маніпулятором* називається механічна система, яка складається з ланок і робочого органу. Наприклад, існують маніпулятори для виконання вантажно-розвантажувальних робіт, зварювання, шліфування і т. д. Промисловий робот може складатися з декількох маніпуляторів (рис. 1.3), розташованих на одній платформі і керованих за допомогою однієї обчислювальної машини. Якщо платформа нерухома – робот не переміщається (рис. 1.1), а якщо робот встановлений на візку – він стає мобільним (рис. 1.2).



Рисунок 1.3 – Типи маніпуляторів

Промислові роботи бувають з одним маніпулятором і з декількома, званий як «багато ручний робот» (рис. 1.3).

#### 1.2.4 Керування рухом

Досі розглядалася структура ланок і робочих органів маніпулятора, що визначають зовнішній вигляд робота.

Тепер перейдемо до джерел енергії, що забезпечують його роботу. Крім енергії, що витрачається на виконання операцій, наприклад зварювання, необхідно витратити додаткову енергію на переміщення самих ланок. Для приведення у рух ланок маніпулятора потрібно забезпечити (рис. 1.4):

- розподіл первинної енергії (зазвичай електричної, пневматичної, гідравлічної);
- перетворення первинної енергії у механічну;
- передачу механічної енергії до ланок;
- керування рухом (за положенням, швидкістю, зусиллям, прискоренням і т. д.).

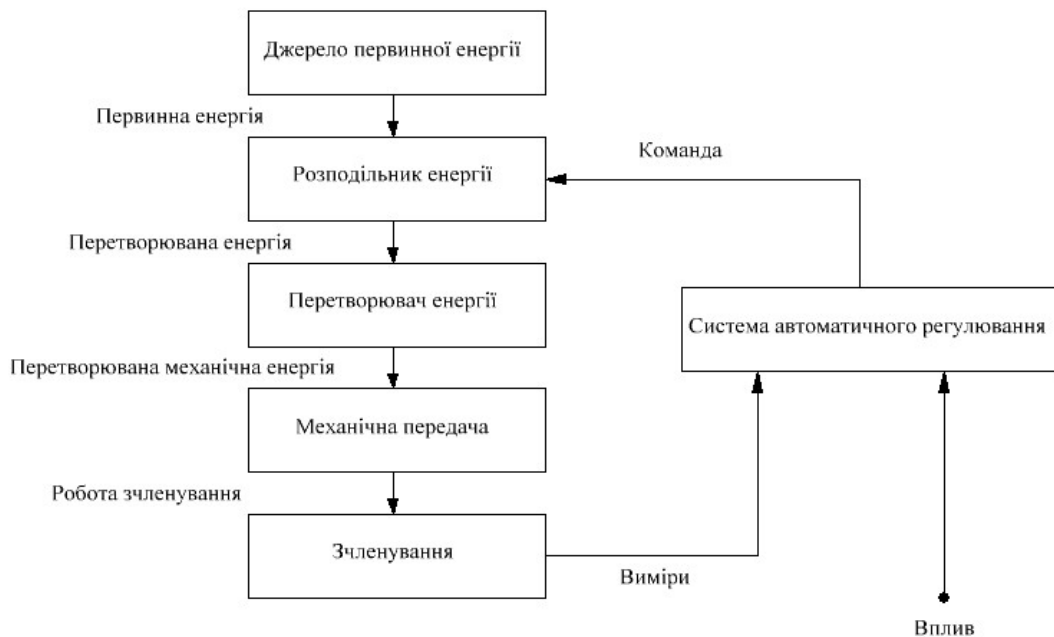


Рисунок 1.4 – Алгоритм забезпечення рухом робота

### *Безпосереднє керування рухом*

Керування рухом найпростіше робити за допомогою приводів, кожен з яких безпосередньо пов'язаний з віссю відповідного зчленування. Однак таке рішення застосовується досить нечасто через наступні випадки:

- більшість перетворювачів механічної енергії за своєю конструкцією передають високі швидкості виконавчим органам, але створюють малі зусилля для застосування редукторів;
- механізм приводу з редуктором має великі габарити, що перешкоджає виконанню завдання (особливо, якщо привід розміщується поблизу робочого органу);
- кожен привод має масу і моменти інерції, які збільшують його масу, і моменти інерції ланок, та всієї системи в цілому. Ці додаткові навантаження необхідно враховувати при виборі приводів, розташованих на ланках, так як вони істотно збільшують загальну масу.

### *Централізоване керування рухом*

На відміну від вказаного вище рішення, можна перенести всі перетворювальні пристрої на платформу робота і передавати рух зчленування за допомогою відповідних кінематичних ланцюгів. Очевидно, що цей спосіб призводить до збільшення ваги платформи і ланок, особливо коли доводиться забезпечувати їх високу міцність. Крім того, доводиться враховувати наступне:

- передача руху через більшість зчленувань ускладнюється в механічній системі із геометрією, яка змінюється;
- тертя у механічних передачах призводить до втрати енергії і особливо до зниження точності (внаслідок впливу, з одного боку, зміни зусиль, а з іншого – люфту, викликаного зносом шестерень);
- пружність деяких елементів може призводити до виникнення ударів і вібрацій.



### *Змішане керування рухом*

Крім названих вище двох типів конструкцій, також можуть існувати проміжні варіанти, в яких знайдені кращі компромісні рішення для перетворення енергії, які враховують технічні вимоги, необхідні для вирішення завдання. Проте часто маса ланок виявляється більша за масу корисного навантаження в 10 – 100 разів (і навіть більше), що вимагає раціонального підходу при конструюванні. На рішення впливає фізична природа первинної енергії, хоча в ряді випадків цим впливом можна знехтувати.

Не наводячи тут порівняльні оцінки, можна вказати, що гідравлічний привід більш вигідний, так як має потужність на одиницю маси двигуна в 10 разів більша, ніж аналогічний електричний двигун, що сильно впливає на конструкцію робота.

### **Контрольні питання**

1. Наведіть структуру і конструкцію робота.
2. Які робочі органи робота ви знаєте?
3. Для чого існують ланки робота?
4. Дайте визначення поняттю «маніпулятор».
5. Які види керування рухом робота ви знаєте?

## 2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ РЕАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Узагальнена структура

Розглянемо основні принципи побудови електромеханічних пристроїв. Більшість електромеханічних пристроїв мають ряд загальних принципів побудови і функціонування, які можна проілюструвати узагальненою структурною схемою, яка представлена на рисунку 2.1.

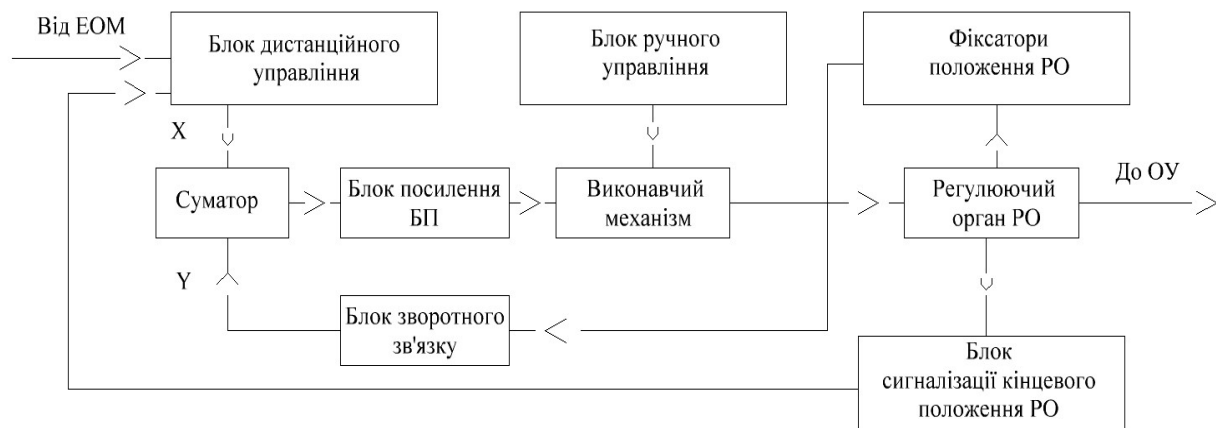


Рисунок 2.1 – Узагальнена структура основних принципів побудови електромеханічних пристроїв

Тут **БЛОК ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ** служить для прийому керуючої інформації від ЕОМ і для її перетворення у вид і форму, зручних для керування виконавчим механізмом.

**X** – вихідний сигнал блоку дистанційного керування. Він може бути як аналоговим, так і дискретним залежно від типу виконавчого механізму (далі – ВМ) і його принципу дії.

**БЛОК РУЧНОГО КЕРУВАННЯ** служить для ручного керування ВМ, для його перевірки, а іноді для роботи в автономному режимі.

**СУМАТОР** служить для виділення різниці між сигналом  $X$  і сигналом  $Y$  (сигналом зворотного зв'язку), який в свою чергу характеризує виконання регулюючим органом команди, яка подається від ЕОМ.

**БЛОК ПОСИЛЕННЯ** призначений для посилення вихідного сигналу суматора за потужністю і напругою, а також для перетворення його за формою з метою керування ВМ.

**ВИКОНАВЧИЙ МЕХАНІЗМ** – це пристрій, який перетворює сигнал, що впливає на нього, у механічне переміщення, яке може бути лінійним, кутовим тощо (наприклад електродвигун з редуктором).

**РЕГУЛЮЮЧИЙ ОРГАН.** За його допомогою здійснюється регулюючий вплив на об'єкт керування.

**ФІКСАТОР ПОЛОЖЕННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНОГО ОРГАНУ** (далі – **РО**) – датчик місцевого зворотного зв'язку, який може фіксувати, наприклад, конкретні положення вихідної ланки РО. Необхідний для точного визначення конкретної позиції РО і реалізації зворотного зв'язку.

**БЛОК СИГНАЛІЗАЦІЇ КІНЦЕВОГО ПОЛОЖЕННЯ РО.** Служить для сигналізації кінцевого положення РО. За сигналами цього блоку, блок дистанційного керування відключає ВМ з метою запобігання аварійних ситуацій.

**БЛОК ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ** служить для посилення і перетворення сигналу з виходу фіксатора положення РО до величини, прийнятною для входу суматора.

Команда від ЕОМ надходить до блоку дистанційного керування виконавчого пристрою. Тут вона перетворюється у код або в аналогову величину в залежності від принципу побудови суматора, блоку посилення і інших цілей.

Цей код або аналогова величина пропорційні необхідному регулюючому впливу на об'єкт керування. Ця величина з виходу блоку дистанційного керування надходить на вхід суматора, на другий вхід якого подається сигнал зворотного зв'язку, і далі через блок посилення на вхід виконавчого механізму,

вихідна ланка якого пов'язане з РО. При цьому здійснюється просторове переміщення РО (лінійне, кутове, ...), пропорційне поданим від ЕОМ командному впливу. У зв'язку з похибками і нелінійністю у каналі проходження і перетворення команди, вона може бути виконана регулюючим органом неточно (з похибкою). З метою зниження цієї похибки введений ланцюг зворотного зв'язку, який містить, по-перше, фіксатор положення РО (датчик положення РО) і далі – блок зворотного зв'язку, з виходу якого сигнал зворотного зв'язку подається на другий вхід суматора. Таким чином, на виході суматора завжди є сигнал, що дорівнює різниці між сигналом команди (X) і сигналом зворотного зв'язку (Y). Оскільки сигнал Y відображає дійсний стан РО, тобто характеризує результат виконання команди, різниця між сигналами на вході суматора пропорційна помилці виконання команди. Цей сигнал впливає на виконавчий механізм через блок посилення, сприяючи усуненню похибки. У результаті цього, точність виконавчого пристрою підвищується.

## **2.2 Різновиди електромеханічних систем та основні принципи їх побудови**

Існує безліч електромеханічних систем, що відрізняються принципом дії, структурою, елементами, принципом керування виконавчим пристроєм, джерелом елементів живлення тощо.

За методом порівняння сигналів, електромеханічні системи можуть бути:

- аналоговими, в яких сигнал неузгодженості виділяється різними методами в аналоговій формі;
- цифровими, в яких задавальним пристроєм є ЕОМ, а сигнал неузгодженості виділяється цифровою формою у вигляді коду;
- змішаними цифро-аналоговими.

За структурною схемою електромеханічні системи можуть бути:

- одно- і двоканальними;
- з одним або декількома приймаючими пристроями;

- з послідовним або паралельним коригуючими пристроями;
- простими і взаємопов'язаними складними.

На практиці найбільш поширеними є одноканальні слідкуючі системи. Для підвищення точності застосовуються двоканальні слідкуючі системи, відомі як системи грубого і точного відліку. У разі, коли сумарна похибка обчислюється кутовими секундами при великому передавальному відношенні електричної редуції, застосовуються також триканальні слідкуючі. Відомі приклади, коли від одного задавального пристрою керуються різні об'єкти, тобто, є кілька приймаючих пристроїв.

За типом вимірювальних елементів слідкуючі системи і регулятори можуть мати: індуктивні, індукційні, потенціометричні, фотоелектричні, ємнісні, генераторні та інші датчики.

Поширення отримали індуктивні та індукційні елементи, які найбільш відповідають сучасним експлуатаційним вимогам.

За типом виконавчих пристроїв слідкуючі системи і регулятори можуть бути гідравлічними, пневматичними і комбінованими (з муфтами), з електродвигунами змінного і постійного струмів, кроковими двигунами, моментними двигунами тощо.

Залежно від типу виконавчих пристроїв у малопотужних системах застосовуються, головним чином, напівпровідникові підсилювачі змінного і постійного струмів.

У системах середньої потужності можуть застосовуватися магнітні підсилювачі і тиристорні перетворювачі. У потужних системах застосовуються електромашинні підсилювачі і тиристорні перетворювачі.

За принципом керування виконавчим двигуном, найбільшого поширення мають слідкуючі системи і регулятори безперервної дії з пропорційною зміною сигналу. На обмотку керування двигуном подається напруга, пропорційна куту неузгодженості, і відповідно частота обертання виконавчого двигуна, яка пропорційна сигналу неузгодженості. Застосовується також керування релейного типу, при якому на обмотку керування двигуна при певному куті

неузгодженості або при певному значенні керуючого сигналу подається максимальна напруга. При частотному керуванні двигуном, на обмотку керування подаються імпульси постійної тривалості, але змінюється частота їх проходження, або при постійній частоті проходження імпульсів змінюється їх тривалість. При цьому частота обертання двигуна пропорційна частоті імпульсів або їх тривалості. Існують також інші принципи керування виконавчими пристроями.

Наведені різновиди носять умовний характер. Вони вказують лише на велику різноманітність електромеханічних систем.

Всі електромеханічні системи поділяються на 5 типів:

- ЕМС позиційної дії, наприклад, система позиціонування магнітних головок;

- *ЕМС постійної швидкості*. Їх призначення – підтримка заданої постійної швидкості вихідної ланки;

- *ЕМС змінної швидкості*. Призначені для переміщення вихідної ланки із заданим прискоренням у кожен заданий момент часу;

- *ЕМС слідкуючого типу*. Найбільш поширеними з них є системи дистанційного спостереження за кутовими і лінійними переміщеннями. Вони здійснюють з певною точністю передачу кута або лінійного переміщення при заданому навантаженні на вихідній осі від аналогових і вимірювальних елементів або цифрових обчислювальних машин в якості задавальних пристроїв, причому закон зміни руху вхідної осі або сигналу з ЕОМ по куту, швидкості і прискорення може мати будь-який вид, включаючи довільну і випадкову функції часу;

- *ЕМС комбінованого типу*. Слід зазначити, що багато хто з реально діючих ЕМС, перш за все більшість систем позиціонування, належать до цього типу, так як у них зазвичай потрібна реалізація двох або трьох зазначених вище властивостей.



### 2.2.1 Електромеханічні системи позиційного типу

Основне завдання таких пристроїв – установка вихідної ланки регулюючого органу в задане положення із заданою точністю.

Відомі два типи подібних пристроїв:

- *системи позиціювання*, які мають два положення, що працюють за принципом відкрити – закрити. Ці пристрої є найбільш простими, в них використовуються для зворотного зв'язку датчики кінцевих положень, при спрацьовуванні яких виконавча частина пристрою відключається.

- *пристрої, призначені для точного позиціонування вихідної ланки* регулюючого органу в будь-який заданий стан, який перебуває у робочому діапазоні переміщень даного пристрою. Застосовуються у системах позиціювання магнітних головок у накопичувачах на магнітних дисках, в графічних реєструючих пристроях тощо.

### 2.2.2 Електромеханічні системи постійної швидкості

Основна функція таких пристроїв – переміщення вихідної ланки РО із заданою швидкістю, що встановлюється із заданою точністю.

Здебільшого це електроприводи, що мають на виході ланку з кутовим переміщенням (обертанням).

У даних пристроях у порівнянні з пристроями першого типу замість датчика положення РО встановлено датчик швидкості, на виході якого є рівень напруги, а іноді код, в залежності від типу датчика, пропорційний швидкості переміщення вихідної ланки. Найчастіше у якості такого датчика використовується тахогенератор, що представляє собою генератор постійного струму.

Загалом, алгоритм роботи схеми аналогічний попередньому.

### 2.2.3 Електромеханічні системи змінної швидкості

Основне призначення таких пристроїв – переміщення вихідної ланки РО із заданою швидкістю щодо кожного моменту часу і для кожного поточного проміжного положення ланки РО, тобто режим зміни швидкості в даному випадку є робочим режимом, в той час як в пристроях постійної швидкості режим зміни швидкості є перехідним режимом.

У структурній схемі подібних пристроїв передбачається установка датчика прискорень вихідної ланки РО і формування сигналу зворотного зв'язку, пропорційного цьому прискоренню. У схему також вводяться блоки, для запобігання автоколивального режиму.

### 2.2.4 Електромеханічні системи слідкуючого типу

У зв'язку з широким впровадженням електронних обчислювальних машин в автоматичних пристроях, з'явилася потреба у створенні цифрових слідкуючих систем і регуляторів. У тих випадках, коли немає такої необхідності, як і раніше застосовуються аналогові слідкуючі системи і регулятори, які відрізняються своєю простотою.

Найбільш поширеними слідкуючими системами є *системи дистанційного спостереження за кутовими і лінійними переміщеннями*. Вони здійснюють з певною точністю передачу кута або лінійного переміщення при заданому навантаженні вихідного валу, від аналогових і вимірювальних елементів або цифрових обчислювальних машин в якості задавальних пристроїв, причому закон зміни руху вхідної осі або сигналу з ЕОМ за кутом, швидкістю і прискоренням, може мати будь-який вигляд, включаючи довільну і випадкову функцію часу. Специфіка роботи цих систем пов'язана з вимогами отримання необхідної точності передачі кутових і лінійних переміщень.

На рисунку 2.2, як приклад представлена структура найбільш поширеної аналогової системи передачі кута.

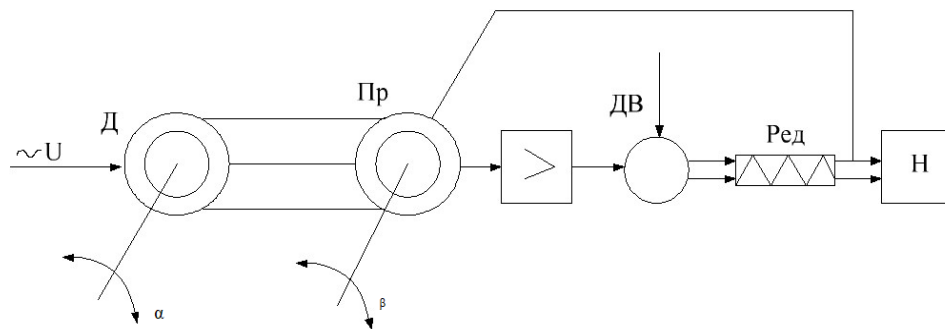


Рисунок 2.2 – Структура аналогової системи передачі кута

Крім вимірювальних елементів, датчика Д і приймача Пр, які визначають в основному точність системи, система складається з підсилювально-перетворювального пристрою, до якого входять елементи коригувального контуру і перетворювачі електричних сигналів (демодулятори і модулятори), з виконавчого двигуна ДВ з редуктор Ред, який відпрацьовує кут неузгодженості до узгодженого положення між кутами  $\alpha$  і  $\beta$ , долаючи момент навантаження  $H$  на вихідній осі.

На рисунку 2.3 представлена типова функціональна схема цифрової слідкуючої системи, в якій роль задавального пристрою виконує ЕОМ, порівняння вихідних сигналів задавального і приймального пристрою у вигляді двійкового коду відбувається в ЕОМ, а різниця кодів перетворюється у перетворювачі код-напруга ПКН. Для цієї мети в якості датчика зворотного зв'язку (приймача Пр) застосовується або кодовий перетворювач, або аналоговий датчик з подальшим перетворенням аналогового сигналу в код. Перетворювач аналог-код ПАК є джерелом додаткової похибки у цифрових слідкуючих системах.

Існує безліч різних пристроїв автоматичного регулювання: регулятори частоти обертання двигуна, регулятори температури, тиску, вологості різних об'єктів регулювання, регулятори частоти і амплітуди напруги джерела живлення тощо. Коригувальні пристрої, що застосовуються у системах автоматичного керування, відносять також до регуляторів.

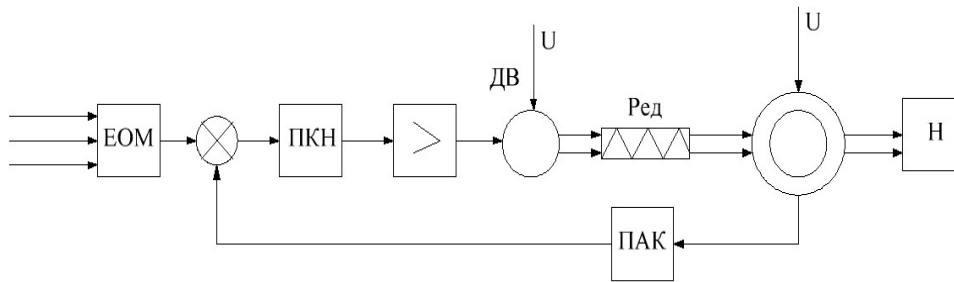


Рисунок 2.3 – Типова функціональна схема цифрової слідкуючої системи

Як приклад на рисунку 2.4 наведена схема регулятора частоти обертання двигуна. Значення частоти обертання може бути змінено пропорційно напрузі  $U_1$  задавального пристрою ЗП.

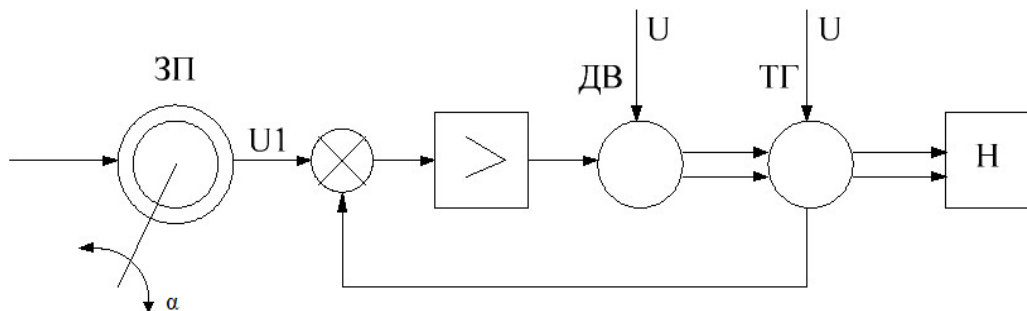


Рисунок 2.4 – Схема регулятора частоти обертання двигуна

Датчиком зворотного зв'язку є тахогенератор змінного або постійного струму ТГ, який в основному і визначає точність регулювання.

### Контрольні питання

1. Опишіть узагальнену структуру основних принципів побудови електромеханічних пристроїв.
2. Які різновиди електромеханічних систем та основні принципи їх побудови ви знаєте?
3. Які електромеханічні системи позиційного типу ви знаєте?
4. Які електромеханічні системи постійної швидкості ви знаєте?

5. Які електромеханічні системи змінної швидкості ви знаєте?
6. Які електромеханічні системи слідкуючого типу ви знаєте?
7. Опишіть структуру аналогової системи передачі кута.
8. Охарактеризуйте типову функціональну схему цифрової слідкуючої системи.
9. Опишіть схему регулятора частоти обертання двигуна.

### 3 ПРИЗНАЧЕННЯ І ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

#### 3.1 Узагальнена структура

На рисунку 3.1 приведена узагальнена структура системи позиціонування.

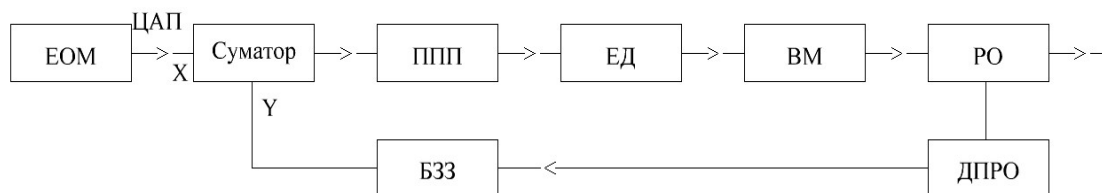


Рисунок 3.1 – Узагальнена структура системи позиціонування

На виході блоку зворотного зв'язку БЗЗ повинен бути сформований код  $Y$ , пропорційний поточному положенню вихідної ланки регулюючого органу, який виробляється датчиком положення регулюючого органу ДПРО; код  $Y$  порівнюється з кодом  $X$  (є командою ЕОМ), який визначає необхідну позицію РО.

Підсилювально-перетворюючий пристрій ППП служить для перетворення і посилення сигналу з виходу суматора для керування електродвигуном ЕД.

Між виходом ЕОМ і входом суматора може бути розташований ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач).

Можлива й інша структура системи позиціонування, наведена на рисунку 3.2.

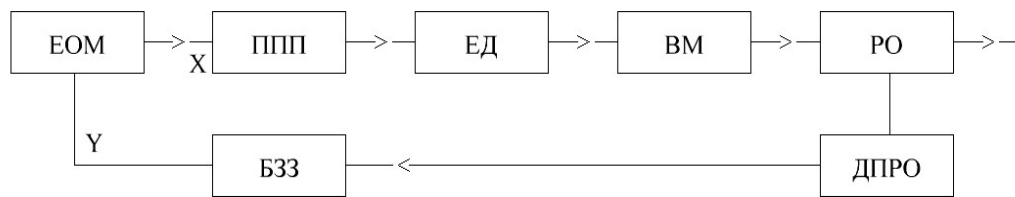


Рисунок 3.2 – Структура системи позиціонування

В даній схемі коригувальний вплив, заснований на визначенні реального стану вихідної ланки РО, формує сама ЕОМ. Здійснюється це за рахунок порівняння початкового значення  $X$  і значення сигналу зворотного зв'язку  $Y$ . Коригувальний вплив є різницею між цими значеннями. У даному випадку на виході БЗЗ повинен бути сформований код  $Y$ , відповідний положенню вихідної ланки РО.

В якості первинних перетворювачів переміщення в ЦСП широко використовуються пристрої, що генерують безперервний аналоговий вихідний сигнал, пропорційний переміщенню.

До таких пристроїв відносяться потенціометри, сельсини і синусно-косинусні обертові трансформатори (далі – СКОТ).

Вони володіють високою роздільною здатністю, гарною перешкодозахищеністю і мають невеликі габаритні розміри.

Діапазон похибки позиціонування для більшості ПР з позиційним або контурним керуванням становить 0,2–2 мм, що еквівалентно відносній похибці 2-15–2–11 по відношенню до використовуваних діапазонів переміщення. Зазвичай у них використовуються аналогові первинні перетворювачі.

Промислові роботи, які оснащені аналоговими первинними перетворювачами, зазвичай не поступають за точністю роботам, в яких використані цифрові датчики з прямим перетворенням. Це пояснюється не тільки тим, що на основі аналогових первинних перетворювачів успішно реалізуються аналого-цифрові перетворювачі переміщень, які не поступаються



кодувальним перетворювачам, а й можливістю застосування навчання при програмуванні промислових роботів.

Попри всю різноманітність принципів керування та конкретних технічних рішень, система автоматичного керування рухом ПР може бути представлена узагальненою структурною схемою, яка показана на рисунку 3.3.

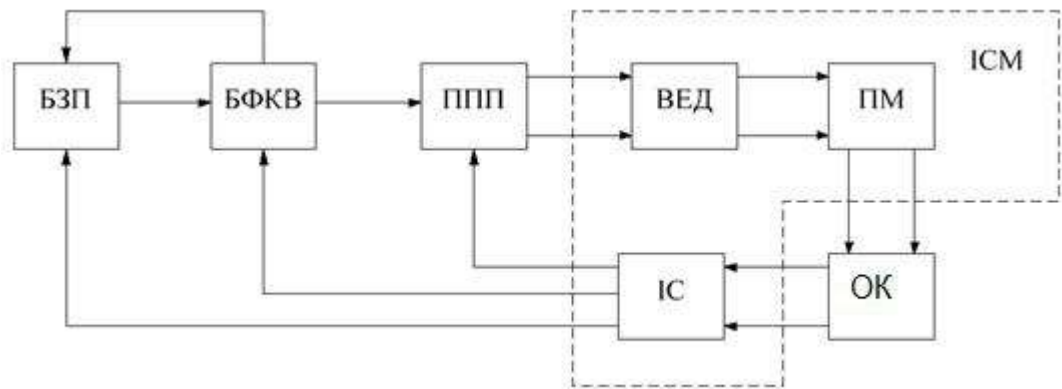


Рисунок 3.3 – Система автоматичного керування рухом ПР

Вона містить блок завдання програми БЗП, блок формування керуючих впливів БФКВ, підсилювально-перетворювальний пристрій ППП, виконавчий електродвигун ВЕД, передавальний механізм ПМ, об'єкт керування ОК і інформаційно-вимірювальну систему ІС. Сукупність ВЕД, ПМ і ІС утворюють інформаційно-силовий модуль (ICM), який спільно з ППП становить ЕМТП.

*Блок завдання програми* зазвичай використовується для декількох каналів керування ступенями рухливості робота, які спільно забезпечують переміщення у просторі його робочого органу; БЗП містить пам'ять програми і логіко-обчислювальний пристрій, який виконує первинну обробку команд програми і видачу їх на вхід контурів керування переміщенням в узгодженій формі. Видача команд обумовлена наявністю відповідного сигналу про виконання попередніх команд або є функцією часу.

Блок формування керуючих впливів БФКВ призначений для формування сигналів, що безпосередньо впливають на ЕМТП робота. Вихідною

інформацією для нього служать завдання на переміщення від БЗП, а також інформація про стани ланок ІСМ маніпулятора через ІС.

Під час керування у функції часу цей зв'язок може не використовуватися.

При контурному керуванні завдання ЦСП складається у відстеженні безперервної зміни завдання за положенням. Структурна схема контуру керування аналогічна схемі на рисунку 3.3, при цьому змінюються лише функції вхідних пристроїв.

Блок завдання програми формує у певному темпі послідовність завдань за положенням, які становлять траєкторію руху. Частота видачі завдань повинна бути такою, щоб дискретність не відображалася на плавності механізму і стійкості роботи ЦСП.

Блок формування керуючих впливів БФКВ забезпечує керування становищем із заданою швидкістю і коефіцієнтом посилення. При контурному керуванні знаходять застосування і більш складні закони регулювання положення.

### **3.2 Традиційні побудови**

Аналіз відомих побудов ЦСП свідчить про те, що у ПР високої точності і продуктивності слід використовувати побудова ЕМТП з підлеглими контурами регулювання. Це забезпечує ЦСП широкий діапазон регулювання за швидкістю і положенням у поєднанні з високими динамічними показниками, в умовах значної зміни моменту навантаження. Такий принцип побудови дозволяє налаштовувати окремі контури незалежно і більш точно, домагаючись необхідної якості роботи. Керування такими ЦСП від ЕОМ і застосування в них цифрових регуляторів і засобів корекції зумовлює подальше розширення їх можливостей.

Система містить основний контур регулювання за положенням або швидкістю, охоплений головним зворотним зв'язком за відповідним параметром; і підлеглі контури регулювання напруги, струму двигуна та інших

координат, утворені локальними зворотними зв'язками. При формуванні вхідного сигналу керування швидкістю враховується інформація про неузгодженість за положенням.

Для визначення неузгодженості за положенням використовується аналоговий або цифровий датчик положення, який механічно пов'язаний з ланкою манипулятора. Датчик швидкості може бути, як аналоговим, так і цифровим. У тому випадку, коли використовується прецизійний датчик положення, який володіє високою швидкодією, і при цьому є достатній резерв машинного часу, сигнал, який характеризує швидкість переміщення, може бути отриманий шляхом диференціювання сигналу від датчика переміщення.

Як регулятори струму та швидкості використовуються аналогові операційні підсилювачі, за допомогою яких реалізуються необхідні закони керування.

На рисунку 3.4 представлена структурна схема двоконтурного ЕМТП, де  $\Omega_3$  і  $\Omega_n$  – відповідно задана і поточна швидкості переміщення.

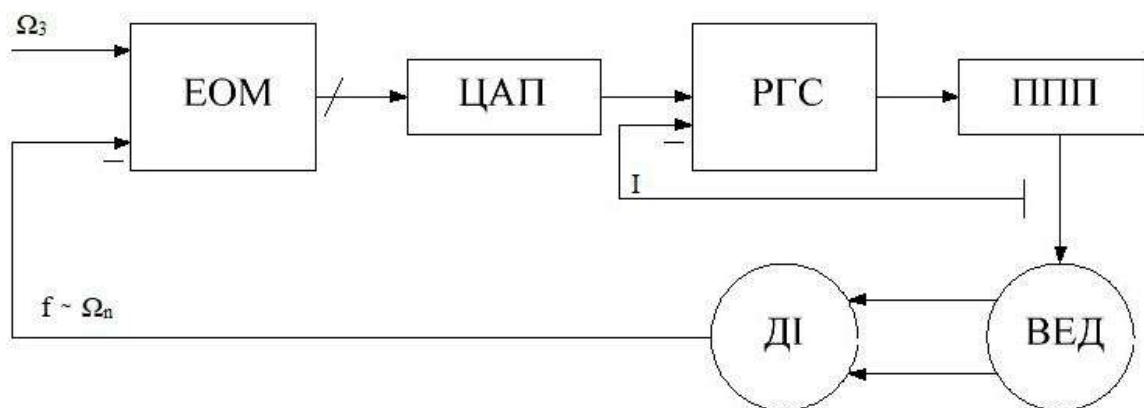


Рисунок 3.4 – Структурна схема двоконтурного ЕМТП

Контур регулятора струму  $I$  утворений ВЕД, ППП і регулятором струму РГС. Контур регулювання швидкості у двоконтурних ЕМТП є головним і містить, крім підлеглого контуру регулювання струму  $I$ , датчик імпульсів ДІ і ЕОМ.

У триконтурному ЕМТП (рис. 3.5) контур регулювання швидкості містить перетворювач швидкості ПРШ і регулятор швидкості РГШ. У головний контур ЦСП, крім підлеглих контурів регулювання струму  $I$  і поточної швидкості, входять перетворювач кута ПРК і ЕОМ, яка обчислює різницю між заданим  $\Theta_z$ , і поточним  $\Theta_n$  значеннями кута.

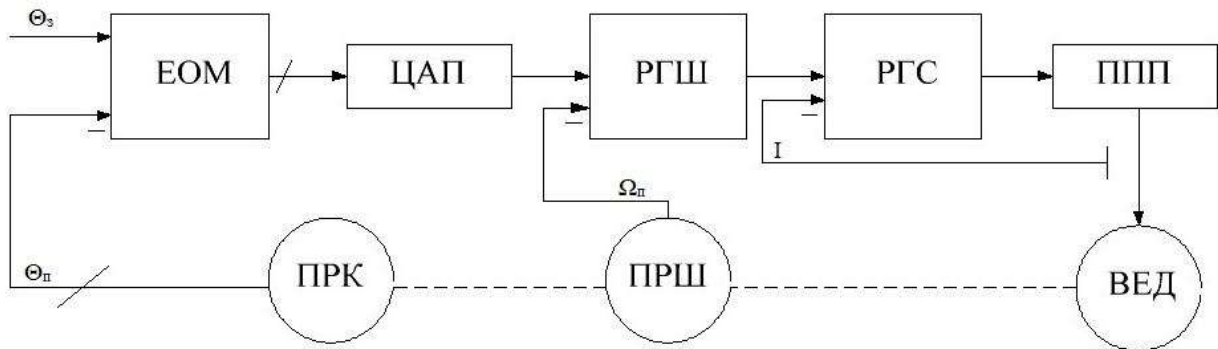


Рисунок 3.5 – Структурна схема триконтурного ЕМТП

Залежно від співвідношення аналогових і цифрових засобів керування такі ЦСП поділяються на:

1) *цифро-аналогові*, в яких цифровим виконується лише зовнішній контур регулювання швидкості виконавчого елемента, а внутрішні контури, у тому числі і ППП, будуються на основі аналогових регуляторів і імпульсно-фазових пристроїв;

2) *цифрові*, з прямим цифровим керуванням всіма контурами регулювання і ППП. При прямому цифровому управлінні виконавчими елементами безперервного типу, ускладнюються алгоритми керування, особливо алгоритми керування струмовим контуром, ППП і пред'являються підвищені вимоги до швидкодії керуючої ЕОМ.

Системи з цифровим керуванням тільки зовнішніми контурами (внутрішні контури при цьому виконуються аналоговими) і при їх практичній реалізації, виявляються більш простими і не вимагають підвищеної швидкодії ЕОМ, яка при достатній швидкодії може забезпечити почергове керування

декількома ЦСП. Досить ефективним в таких ЦСП є використання контролерів на основі мікропроцесорів.

У зв'язку з різноманітністю технічних рішень можливі численні варіанти побудови ЦСП. Головною відмінністю їх особливості є співвідношення між цифровою та безперервною частинами системи, тобто кордоном ПФІ.

Варіант, у якому домінує аналоговий початок, передбачає цифро-аналогове перетворення безпосередньо на виході ЕОМ і подальше аналогове керування переміщенням з використанням у контурах зворотного зв'язку за кутом, швидкістю аналогових елементів. Такій побудові, в повній мірі, властиві переваги і недоліки аналогових ЕМТП, і їх застосування, зазвичай, обмежується системами з помірними показниками точності, швидкодії і вартості.

Можна виділити три основні чинники, які знижують ефективність використання аналогових ЕМТП:

1) переналагодження системи при зміні параметрів керування вимагає зміни установок потенціометрів і заміни окремих елементів, що пов'язано з ручними операціями обслуговуючого персоналу і втратами часу;

2) наявність температурного дрейфу і старіння аналогових елементів схеми, призводить до необхідності у перенастроюванні та проведення періодичних перевірок;

3) відсутність гнучкості не дозволяє проводити розширення функціональних можливостей без зміни апаратного забезпечення. Параметри регулятора оптимізуються залежно від функціональних особливостей і використовуваного ВЕД.

Застосування мікро-ЕОМ спрощує ЦСП за рахунок виключення елементів систем у перенастроюванні, підвищує її гнучкість.

Зміна її параметрів може проводитися за програмою, наприклад від персональної ЕОМ, що істотно знижує витрати часу на перебудову у порівнянні з аналоговими системами. Наявність відповідного програмного забезпечення

дозволяє здійснювати поглиблену діагностику ЦСП, що знижує час на усунення несправності.

Цифро-аналогові системи позиціонування з мікропроцесорним керуванням менш схильні до впливу перешкод, старіння і появи похибок, пов'язаних з температурним дрейфом, оскільки на параметри програмного забезпечення зазначені фактори не діють. Застосування програм корекції помилок дозволяє здійснити контроль і відновлення втрачених або помилкових даних. Ряд труднощів, які виникають в ЦСП з безперервними виконавчими елементами при прямому цифровому керуванні, може бути усунуті при використанні дискретних ЕМТП.

Застосування їх в ЦСП у вигляді традиційних розімкнутих або замкнутих структур не дозволило їм скласти належну конкуренцію безперервним ЕМТП за ефективністю перетворення енергії.

Введення в дискретні ЕМТП додаткових контурів регулювання, тобто вихід на аналогічний з безперервними ЕМТП рівень інформаційного забезпечення, дозволяє дискретним виконавчим елементам конкурувати з безперервними також і за енергетичними показниками.

### **3.3 Дискретні електромехатронні перетворювачі**

Варіанти, що передбачають перевагу у використанні цифрових методів керування, досить привабливі своєю структурної простотою. Це, в першу чергу, відноситься до розімкнених ЕМТП з КЕД, які переважно використовуються у тому випадку, коли можна допустити високі швидкості і прискорення переміщення, дискретність шагового переміщення і перерегулювання.

Однак головна перевага традиційного розімкнутого ЕМТП з КЕД – можливість працювати без датчика положення (часто не реалізується, оскільки контроль відпрацювання буває необхідний через запобігання «втрати» кроків у перехідних режимах). Підвищена чутливість КЕД до моменту інерції навантаження, пов'язана з імпульсним характером керування, ускладнює його

використання у системах зі змінним моментом інерції. Тому в даний час застосування традиційних структур ЕМТП з КЕД обмежена.

Усунення цих обмежень пов'язане з вдосконаленням алгоритмів і способів керування КЕД у локально-замкнутих системах, що вимагають для своєї реалізації підвищення рівня і ступеня інформаційного забезпечення шляхом введення цифрових зворотних зв'язків.

При їх використанні у ЦСП принцип цифрового керування переміщенням від ЕОМ доводиться до логічного завершення.

Підвищенню ефективності таких ЦСП, у значній мірі, сприяє впровадження мікропроцесорного керування і досягнення в області техніки ЦСП.

Структурна схема ЦСП з підвищеним рівнем інформаційного забезпечення та керуванням від мікро-ЕОМ представлена на рисунку 3.6.

Вона містить мікро-ЕОМ, на вхід якої від ЕОМ вищого рівня надходить у цифровій формі задане переміщення  $\Theta_z$ . Поточне значення переміщення  $\Theta_n$  формується на виході ПП, пов'язаного з ВЕД. Поточне значення швидкості переміщення  $\Omega_n$  формується цифровим тахометром ЦТ, а поточне значення прискорення переміщення  $\varepsilon_n$  – цифровим акселерометром ЦА.

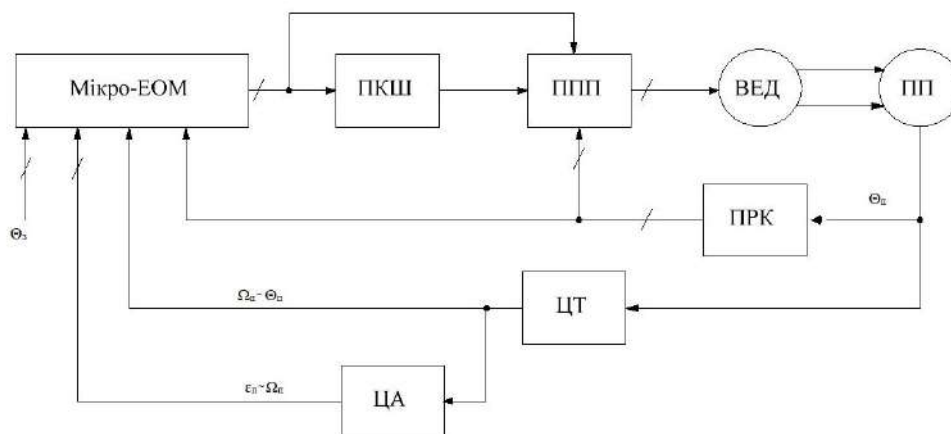


Рисунок 3.6 – Структурна схема ЦСП з підвищеним рівнем інформаційного забезпечення та керуванням від мікро-ЕОМ

Вхід ПП пов'язаний з ротором ВЕД, який керується від мікро-ЕОМ через перетворювач «код-ШІМ» ПКШ і ППП.

Відповідно до закону керування і на підставі інформації про стан системи, що надходить до мікро-ЕОМ по каналах зворотного зв'язку, формується закон керування ВЕД.

Реалізація зворотних зв'язків може бути виконана у варіантах з кодовим, інкрементальним і аналоговим первинним перетворювачами. Слід зазначити, що пропонується варіант у достатній мірі універсальний і може використовуватися в ЦСП з різним співвідношенням аналогової і цифрової частин, він сумісний з цифровим ЦП і сигнальним СП процесорами.

До переваг такої побудови ЦСП відноситься уніфікація інформаційно-силових модулів ІСМ для безперервного і цифрового варіантів безредукторного ЕМТП на основі КЕД та ВЕД. Зміна способів і алгоритмів керування електродвигуном, дозволяє реалізувати на основі таких ІСМ гаму ЕМТП, які володіють широким спектром динамічних і енергетичних показників. Підвищенню ефективності ЦСП з такими ІСМ в значній мірі сприяє керування ЕМТП від ЕОМ.

Залежно від способу обміну даними між ЕОМ і ЕМТП можливі чотири варіанти побудови ЦСП з аналоговим порівнювачем пристроєм (рис. 3.7–3.8).

У схемі на рисунку 3.7, а ЕОМ виконує функції програмного пристрою і забезпечує формування керуючих сигналів через ЦАП і пристрій порівняння ПрП на ЕМТП, контур позиційного (головного) зворотного зв'язку ПЗЗ якого замикається через ПрП. Інформація про стан ЕМТП до ЕОМ не вводиться. Цифро-аналогова система позиціонування є автономною по відношенню до ЕОМ. До переваг побудови такої ЦСП відноситься простота програмного забезпечення, а до недоліків – відсутність контролю за виконанням команд з боку ЕОМ.



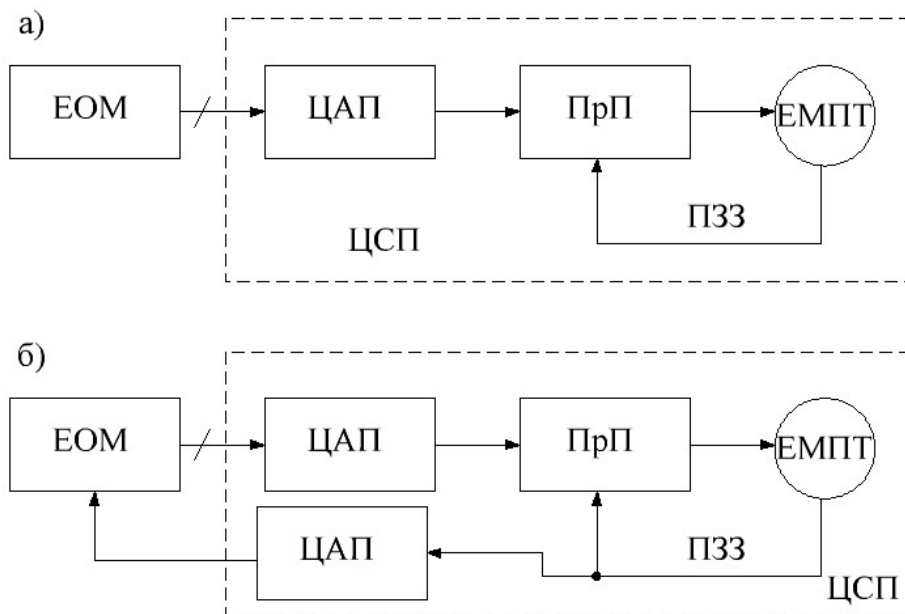


Рисунок 3.7 – Побудова ЦСП з аналоговим порівнювальним пристроєм:  
а – ЦСП автономна по відношенню до ЕОМ; б – ЦСП з АЦП, через який  
інформація про переміщення вводиться до ЕОМ

Другий варіант побудови ЦСП (рис. 3.7, б) передбачає усунення цього недоліку за рахунок введення до складу ЦСП АЦП, через який інформація щодо переміщення вводиться до ЕОМ, що дозволяє постійно контролювати і корегувати траєкторію руху ЕМПТ. Цей варіант побудови ЦСП, без сумніву, є більш перспективним з точки зору подальшого вдосконалення систем даного класу. Цьому значною мірою сприяє прогрес в області розробки цифрових перетворювачів переміщення на основі первинних перетворювачів аналогового типу.

Цифро-аналогова система позиціонування, виконана за другим варіантом, певною мірою зберігає свою автономність відносно до ЕОМ, на відміну від ЦСП, виконаної за варіантом на рисунку 3.8, а, де проводиться їх поєднання. ЕОМ стає складовою частиною ЕМПТ, і головний зворотній зв'язок замикається через неї. ЕОМ виконує цифрову корекцію ЕМПТ, що дозволяє істотно поліпшити динаміку і точність ЦСП. Обсяг обчислень ЕОМ зростає у порівнянні з обсягом обчислень за двома попередніми варіантами, за рахунок

виконання обчислення крім поточних керуючих сигналів і коригувальних впливів.

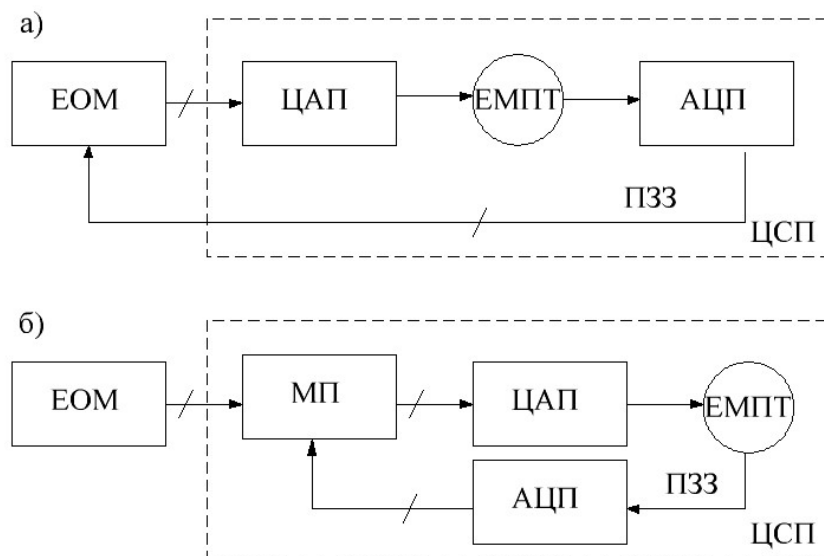


Рисунок 3.8 – Побудова ЦСП з аналоговим порівнювальним пристроєм:

а – ЕОМ є складовою частиною ЕМТП; б – ЦСП по відношенню до ЕОМ з варіантом побудови з МП

При необхідності збереження автономності ЦСП по відношенню до ЕОМ використовується варіант побудови з МП (рис. 3.8, б). На нього покладаються завдання виконавчого рівня керування. Одним з основних переваг мікропроцесорного керування ЦСП є його гнучкість і універсальність, оскільки програма корекції системи розміщується у програмованому (ППЗП) або перепрограмованому (РПЗП) постійному запам'ятовуючому пристрої (ПЗП) МП, що дозволяє виробляти її оперативну зміну.

Залежно від послідовності обробки вхідної інформації, способів ПФІ, можливі численні варіанти побудови систем розглянутого класу, які відрізняються широкою гамою експлуатаційних показників.

Серед них основна увага, зазвичай, приділяється зручності сполучення з ЕОМ, швидкодії, точності, надійності та завадостійкості. Важливим фактором, що дозволяє здійснити оптимальний інженерний синтез системи, є її функціональні можливості по реалізації оптимальних і адаптивних алгоритмів

керування, витрат обчислювального часу керуючої ЕОМ, формування інформації для координатних перетворень у просторі переміщень.

### **Контрольні питання**

1. Опишіть узагальнену структуру системи позиціонування.
2. Дайте характеристику структурі системи позиціонування.
3. Перелічить компоненти схеми системи автоматичного керування рухом ПР.
4. Із яких компонентів складається структурна схема двоконтурного ЕМТП.
5. Опишіть структурну схему триконтурного ЕМТП.
6. Дайте характеристику структурній схемі ЦСП з підвищеним рівнем інформаційного забезпечення та керуванням від мікро-ЕОМ.
7. Опишіть принцип роботи ЦСП з аналоговим порівнювальним пристроєм.

## **4 ВИКОНАВЧІ ЕЛЕМЕНТИ**

### **4.1 Різновиди виконавчих елементів**

Для відпрацювання сигналу неузгодженості у слідкуючих системах і регуляторах в якості виконавчих елементів застосовуються двох- і трифазні двигуни змінного струму, двигуни постійного струму, крокові двигуни і механізми, пневматичні і гідравлічні виконавчі пристрої.

У слідкуючих системах малої потужності до 10–25 Вт найбільшого поширення набули двофазні асинхронні двигуни змінного струму, які прості в керуванні і володіють підвищеною надійністю. Трифазні двигуни змінного струму і двигуни постійного струму як паралельного, так і послідовного

збудження, застосовуються у тих випадках, коли потрібні великі потужності. Для керування нерегульованими приводними двигунами застосовуються виконавчі муфти. Розвиток імпульсної і цифрової техніки привело до розробки і застосування шагових двигунів і механізмів, які можуть виконувати одночасно роль лічильника імпульсів, тобто вимірювального пристрою. У слідкуючих системах знаходять широке застосування і комбіновані виконавчі елементи. До них відносяться двигуни-генератори, двигуни-сельсини, двигуни з демпфером та інші виконавчі механізми.

В останні роки розробляються безконтактні (вентильні) двигуни постійного струму, тихохідні електродвигуни змінного струму, побудовані на принципах електромагнітної редукції, електричні машини з котним ротором тощо.

#### **4.2 Двофазні індукційні двигуни**

Двофазні індукційні двигуни мають ряд переваг у порівнянні з двигунами постійного струму. До цих переваг відносяться безконтактність, менший момент інерції ротора і мала постійна часу, зручність в керуванні можливість регулювання частоти обертання у великих межах. До недоліків цих двигунів відносяться великі габарити і менший ККД. Статор і внутрішній магнітопровід асинхронного двигуна виконуються у вигляді пакетів, набраних з окремих штампованих листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного з метою зменшення втрат від вихрових струмів. Листи статора мають пази для розміщення обмоток. Ротор являє собою алюмінієвий тонкостінний порожнистий циліндр, що обертається між зовнішнім і внутрішнім магнітопроводами. Створено двофазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

Принцип дії двофазних індукційних двигунів з порожнистим ротором заснований на взаємодії еліптичного (в окремому випадку кругового) електромагнітного поля, створюваного обмотками статора, з вихровими

струмами, що наводяться цим полем у роторі. У результаті такої взаємодії на валу двигуна виникає електромагнітний момент, що створює обертання ротора. Цей момент пропорційний добутку магнітних потоків збудження і керування або при ненасиченому магнітопроводі двигуна – добутку напруги збудження  $U_z$  і керування  $U_y$ , і синуса кута зсуву фаз між ними  $\gamma$ :

$$M = k \cdot U_z \cdot U_y \cdot \sin \gamma, \quad (4.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Так як напруга збудження незмінна, то при куті здвигу фаз  $\gamma = 90^\circ$  пусковий момент прямо пропорційний напрузі керування (рис. 4.1):

$$M_{\Pi} = C_m \cdot U_y, \quad (4.2)$$

де  $C_m$  – коефіцієнт пропорційності між пусковим моментом і напругою на обмотці керування.

Ця залежність називається навантажувальної характеристикою. При обертанні порожнистого ротора в ньому наводиться ЕРС, пропорційна частоті обертання, внаслідок чого на роторі виникає гальмівний момент, що знижує момент двигуна. При цьому крутний момент двигуна визначається формулою:

$$M_k = M_{\Pi} - b_{\text{дв}} \cdot \Omega, \quad (4.3)$$

де  $b_{\text{дв}}$  – коефіцієнт електродинамічного гальмування двигуна;

$\Omega$  – частота обертання ротора.

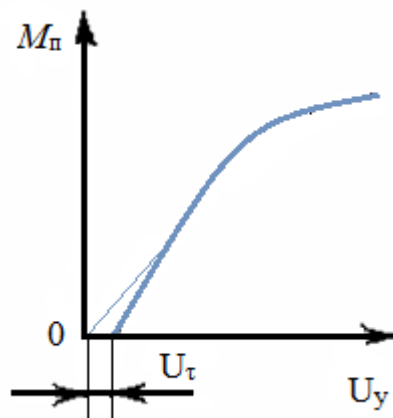


Рисунок 4.1 – Залежність пускового моменту від напруги керування

Механічна характеристика індукційного двигуна має вигляд, представлений на рисунку 4.2. Ця характеристика також нелінійна. Лінеаризацію характеристики при розрахунках зазвичай роблять на ділянці, відповідному робочому режиму двигуна.

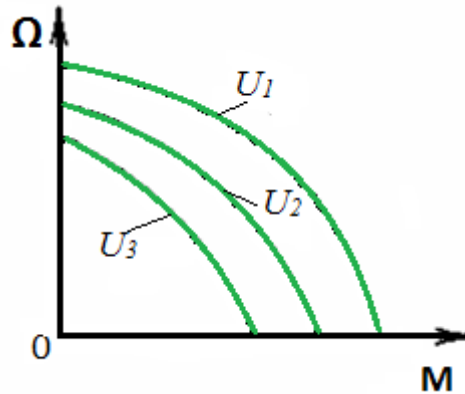


Рисунок 4.2 – Механічна характеристика індукційного двигуна

При розрахунку слідкуючих систем використовують також і характеристики холостого ходу  $\Omega = f(U_y)$  (рис. 4.3).

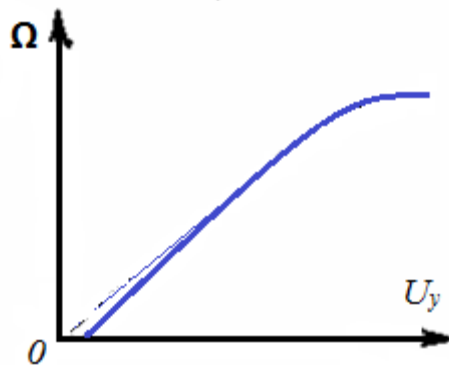


Рисунок 4.3 – Характеристика холостого ходу

Коефіцієнт корисної дії індукційних двигунів з порожнистим ротором порівняно низький і перебуває в межах 0,05–0,15.

Можливі різні способи керування двофазними асинхронними двигунами. Найбільш поширеним способом є регулювання частоти обертання шляхом зміни напруги на обмотці керування при зсуві фаз між напругами збудження та керування, що дорівнює електричному куту  $90^\circ$ . При незмінних величинах

напруги збудження  $U_\varepsilon$  і керування  $U_y$ , змінним параметром може бути різниця фаз між зазначеними напругами. Однак цей метод є неекономічним через те, що обмотки збудження та керування безперервно перебувають під напругою. У цьому випадку представляє інтерес метод, при якому відбувається одночасна зміна зсунутих по фазі на  $90^\circ$  напруги збудження і керування. За умови  $U_\varepsilon = U_y$  пусковий момент пропорційний квадрату напруги:

$$M_{\text{л}} = C_{\text{п}} \cdot U^2. \quad (4.4)$$

Нелінійність цієї характеристики повинна враховуватися при проектуванні слідкуючої системи.

### 4.3 Двигуни постійного струму з незалежним збудженням

З двигунів постійного струму у слідкуючих системах застосовуються в основному двигуни з незалежним збудженням, схема яких наведена на рисунку 4.4, а. Для визначення механічної характеристики двигуна  $\Omega = f(M)$  (рис. 4.4, б) використовується залежність:

$$U = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + E. \quad (4.5)$$

Протилежна ЕРС  $E$  пропорційна потоку збудження  $\Phi$  і частоті обертання якоря:

$$E = C_1 \cdot \Phi, \quad (4.6)$$

де  $C_1$  – конструктивна постійна.

З виразів (4.5) і (4.6) можна отримати:

$$\Omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C_1 \cdot \Phi}. \quad (4.7)$$

Крутний момент  $M_{\text{вр}}$  двигуна пропорційний струму якоря і потоку збудження:

$$M_{\text{вр}} = C_2 \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi, \quad (4.8)$$

де  $C_2$  – коефіцієнт пропорційності.

Підставивши значення струму  $I_{\text{я}}$  з виразу (4.7) в (4.8), отримаємо:

$$\Omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}} M}{C_1 \cdot C_2 \cdot \Phi^2}. \quad (4.9)$$



Потік  $\Phi$  для двигунів з незалежним збудженням можна вважати постійним тоді:

$$C_{\Omega} = \frac{1}{C_1 \cdot \Phi}, \quad (4.10)$$

$$C_M = \frac{C_2 \cdot \Phi}{R_{\text{я}}}. \quad (4.11)$$

При цьому:

$$\Omega = \frac{C_{\Omega} U - M C_{\Omega}}{C_M}, \quad (4.12)$$

або

$$M = \frac{C_M U - C_M \Omega}{C_{\Omega}}. \quad (4.13)$$

З (4.13) випливає, що механічні характеристики для різних значень напруги представляють собою прямі лінії (рис. 4.4, б).

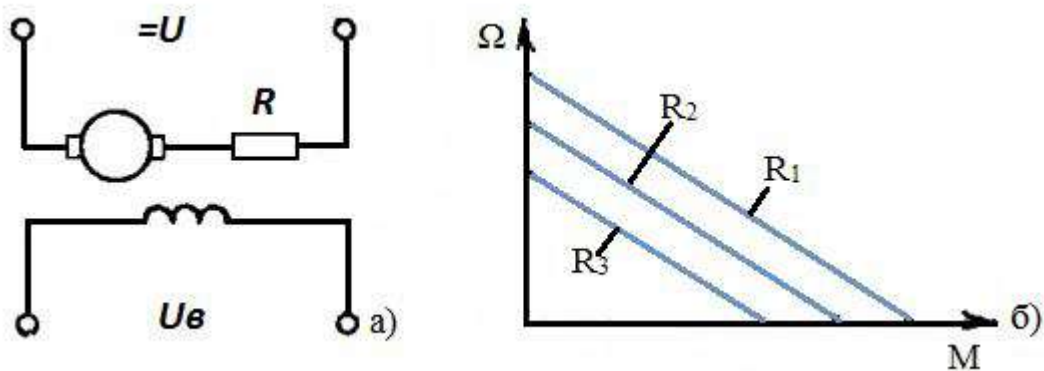


Рисунок 4.4 – Двигун постійного струму з незалежним збудженням:

а – схема включення двигуна; б – механічні характеристики

При відсутності навантаження на валу  $M = 0$ ,  $\Omega = \Omega_{\text{xx}} = C_{\Omega} \cdot U$ .

У момент пуску двигуна  $\Omega = 0$ . Тоді  $M_{\text{ep}} = M_n = C_M \cdot U$ .

З цього ж виразу можна визначити при  $M_{ep} = M_n = const$  залежність

$$U = f(\Omega), \text{ тобто } U = \frac{M}{C_M} + \frac{\Omega}{C_\Omega}.$$

$$\text{Звідси при } \Omega = 0 \quad U = U_{\text{тр}} = \frac{M}{C_M}.$$

Можуть бути різні методи керування частотою обертання двигуна постійного струму. Сюди відносяться: включення зовнішнього опору послідовно з опором якоря, а потім виведення цього опору у міру розгону; шунтування якоря двигуна постійного струму за наявності послідовно включеного опору в ланцюг якоря; шунтування обмотки збудження; зміна напруги на якорі двигуна або напруги збудження. При керуванні з боку обмотки збудження потрібно менше потужності підсилювача, ніж при керуванні з боку якоря. Коли слідкуюча система знаходиться в узгодженому положенні для обмеження струму, який протікає через нерухомий якір, послідовно з якорем включають баластний опір.

У слідкуючих системах застосовується метод зміни напруги. Для керування двигунами постійного струму використовувалися електромашинні підсилювачі, які останнім часом успішно замінюються тиристорними перетворювачами. Застосовуються різні методи імпульсного керування.

#### 4.4 Крокові електродвигуни

У зв'язку з розвитком цифрової обчислювальної техніки виникла задача програмного керування дискретної дії.

Застосування шагових двигунів дозволяє перетворити керуючі імпульси у фіксований кут повороту валу без датчика зворотного зв'язку. При цьому крокові електродвигуни (КЕД) виконують роль як вимірювального, так і виконавчого пристрою. Системи з КЕД є роз'єднаними, і втрата імпульсу призводить до безповоротної помилки. Крокові двигуни застосовуються також

в якості лише виконавчого пристрою у замкнутих системах передачі інформації.

Існує велика різноманітність КЕД, що відрізняються принципом дії, конструкцією, способом керування тощо. Спрощена класифікація цих двигунів наведена на рисунку 4.5.

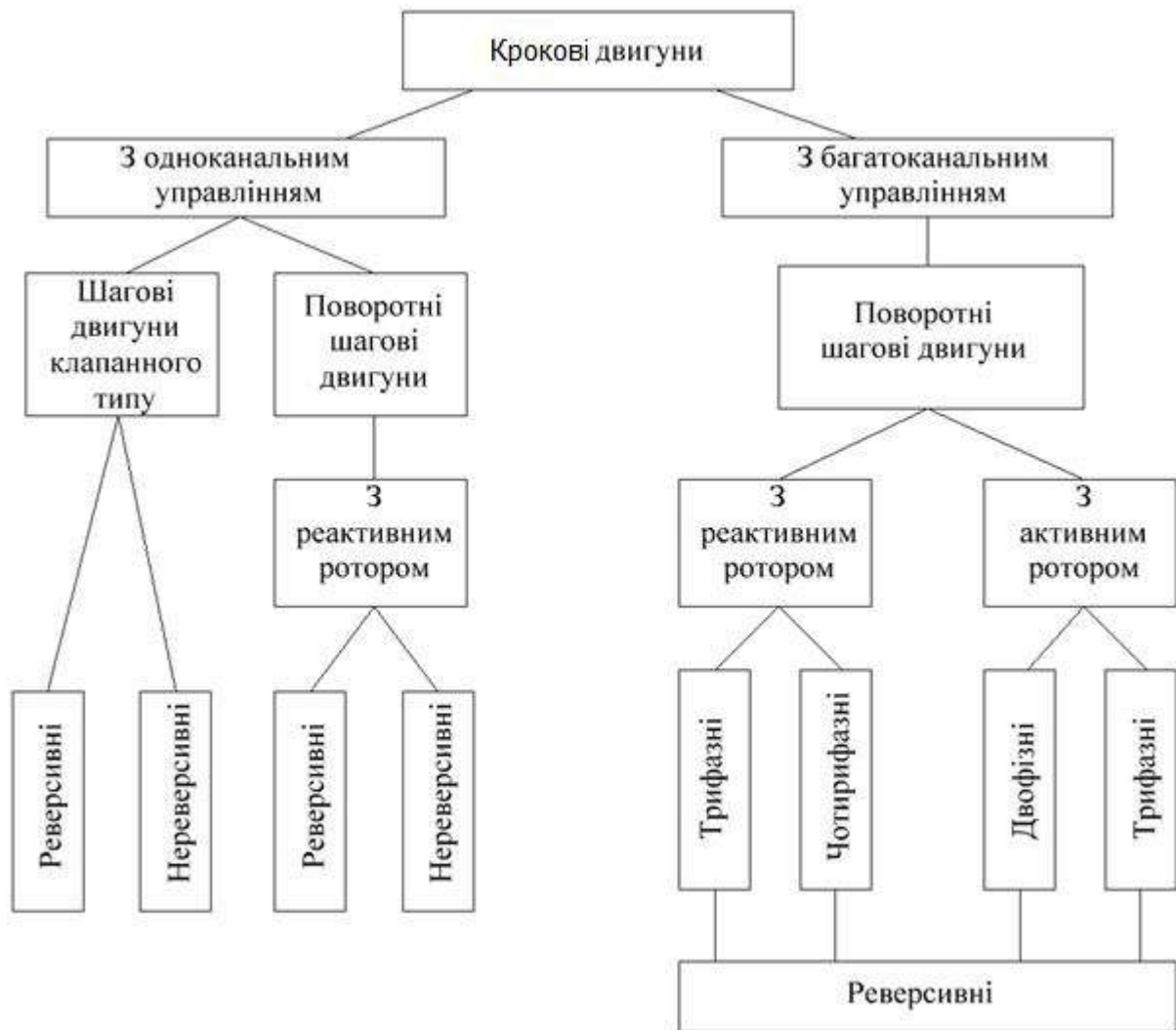


Рисунок 4.5 – Класифікація крокових двигунів

*Реверсивні крокові двигуни клапанного типу – крокові механізми. Як приклад розглянемо реверсивний кроковий механізм типу РШМ-6. При подачі імпульсу постійного струму на одну з його двох обмоток, якір притягається до електромагніту і за допомогою собачки повертає зубчасте колесо, встановлене на вихідному валу, на один зубцевий розподіл. Після припинення подачі*

імпульсу, якір повертається у вихідне положення, а вихідний вал закривається фіксуєчими собачками. Для отримання реверсу імпульси струму подаються на іншу обмотку. При цьому вихідний вал шагового механізму повертається аналогічним чином в іншому напрямку.

Перевагами РШМ клапанного типу є простота керування і фіксація осі у знеструмленому стані механізму.

До недоліків слід віднести складність конструкції механізму штовхаючих і фіксуєчих собачок і малу швидкодію, тобто частоту імпульсів, при яких РШМ працює без пропуску імпульсів.

*Одноканальний реверсивний шаговий двигун з реактивним ротором.* Статор одноканальних реверсивних КЕД має явно-полюсну систему із зосередженими обмотками, а ротор має зубці. Двигуни виконуються з різним полюсним розподілом на роторі і статорі. Розглянемо принцип роботи двигуна, що має шість полюсів на статорі і вісім зубців на роторі. На рисунку 4.6 показано взаємне розташування зубців ротора і статора у початковому положенні.

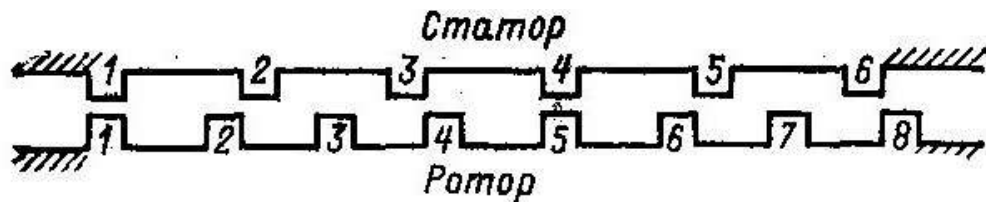


Рисунок 4.6 – Розташування зубців ротора і статора у початковому положенні

На рисунку 4.7 приведена схема включення обмоток статора. На кожному полюсі статора розташовані по дві обмотки, позначені однаковими цифрами. Обмотки зі штрихами, в позначенні, використовуються при зміні напрямку обертання двигуна.

У момент включення КЕД на обмотки 1, 4 подається постійна напруга, при цьому ротор займає вихідне положення. При подачі керуючого імпульсу, наприклад, на затиск IV, підключаються обмотки 3', 6', 5', 2'. Одночасно

напруга подається на обмотки 1', 4', які включені зустрічно обмоткам 1, 4. Відбувається розмагнічування полюсів статора 1, 4. Завдяки наявності конденсатора  $C_2$  і через малий опір обмоток 5', 2' наростання струму в обмотках 5', 2' відбувається швидше, ніж в обмотках 3', 6', тому ротор встановлюється таким чином, що його полюса 2, 6 стануть під полюсами 2, 5 статора. Коли конденсатор зарядиться магніторухома сила (далі – МРС) обмоток 6', 3' приблизно буде вдвічі більше МРС обмоток 2', 5', ротор повернеться і займе нове положення. При цьому полюси 3, 7 стануть під полюсами 3, 6 статора. Після зняття керуючого імпульсу обмотки 2', 5', 3, 6 і 1', 4' знеструмлюються і ротор займе вихідне положення, тобто полюси ротора 8, 4 встановлюються під полюсами 1, 4 статора. При реверсі керуючі імпульси подаються на затиск III. Ємності  $C_1$ ,  $C_2$  схеми керування залежать від значення і характеру навантаження.

Перевагою одноканального КЕД є простота схеми керування.

Недоліками є порівняно великий шаг і невисока близько 100 – 150 Гц, велике споживання енергії через постійно включення обмоток, відсутність фіксації положення ротора при знеструмлених обмотках.

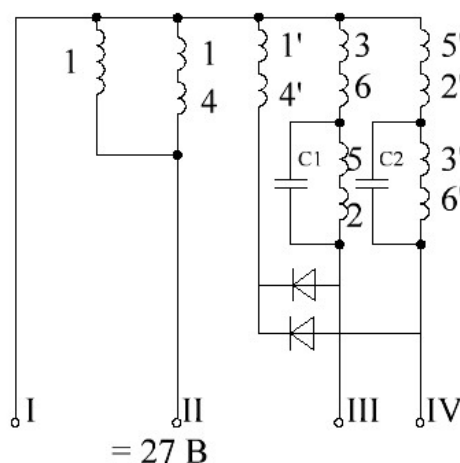


Рисунок 4.7 – Схема включення обмоток статора

*Трифазний реверсивний кроковий двигун з активним ротором.* Трифазний КЕД з активним ротором являє собою модифікований синхронний двигун.

Статор такого двигуна виконаний у вигляді шихтованого пакета з розподіленою двошаровою обмоткою, з'єднаної у зірку.

Ротор двигуна-двополюсний, виготовлений з магнітотвердого сплаву. З метою поліпшення форми кривої статичного синхронізуючого моменту, пакет статора виконаний зі скосом пазів на один зубцевий розподіл, а обмотки-з дробовим числом пазів на полюс і фазу.

Шаговий двигун живиться знакозмінними імпульсами і працює наступним чином. Ротор встановлюється уздовж осі результуючої МРС. Дискретно поле, яке переміщується, створюється шляхом почергового перемикання обмоток статора. Порядок комутації обмоток і напрямки результуючої МРС статора показані на рисунку 4.10.

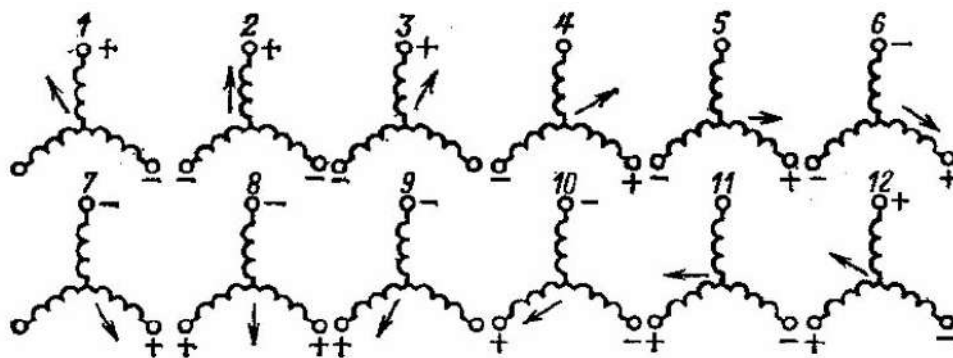


Рисунок 4.10 – Порядок комутації обмоток і напрямки результуючої МРС статора

Крок двигуна дорівнює  $30^\circ$ . Реверс двигуна забезпечується зміною черговості комутації обмоток.

Крокові двигуни з активним ротором мають порівняно великий шаг і мають невисоку прийнятність (до 300 Гц).

Для керування КЕД з активним ротором потрібна складна схема керування (на КЕД подаються знакозмінні імпульси напруги). До переваг таких двигунів слід віднести те, що вони володіють внутрішньою магнітною фіксацією при знеструмлених обмотках керування (фіксація забезпечується магнітним потоком ротора, коли пакет статора не має скося пазів).

### *Чотирьохфазний реверсивний кроковий двигун з реактивним ротором.*

Крокові двигуни з реактивним ротором мають феромагнітні зубчасті ротор і статор. Статор чотирьохфазного двигуна має вісім полюсів з симетричними зубцями. Обмотки керування розташовуються на полюсах статора. Кожна обмотка складається з двох котушок, розміщених на діаметрально протилежних полюсах.

Обмотки керування КЕД живляться однополярними імпульсами постійного струму. У вихідному положенні зубці ротора співвісні тільки з зубцями двох діаметрально розташованих полюсів.

При кожному перемиканні обмоток, ротор двигуна повертається на  $1/4$  зубцевого ділення. Напрямок обертання визначається черговістю комутації обмоток. Для керування такими двигунами потрібна складна схема. До переваг таких двигунів можна віднести високу швидкодію. При малих кроках деякі конструкції двигунів мають прийнятність понад 1000 Гц.

## **4.5 Вентильні двигуни**

Рішення завдання підвищення швидкодії і точності ЦСП розімкнутого типу з КЕД може бути досягнуто, наприклад, введенням місцевого зворотного зв'язку (далі – МЗЗ) в КЕД поза положенням ротора і режиму самокомутації. При цьому КЕД трансформується у так званий вентильний двигун (далі – ВЕД) з дискретною комутацією. Безперервна комутація ВЕД може розглядатися як граничний випадок дискретної комутації з нескінченним коефіцієнтом дроблення шагу.

У зв'язку з тим, що первинним завданням при створенні ВЕД, була заміна колекторного вузла електродвигуна постійного струму електронним комутатором і створення двигунів з близькими до них механічними і електричними характеристиками. ВЕД називають також безконтактними двигунами постійного струму. Однак назва ВЕД найбільш повно відображає фізичні процеси у ньому.

Дискретний електромеханічний перетворювач (далі – ЕМПТ) з ВЕД працює у режимі самокомутації обмоток керування. На відміну від по шагового керування, використовуваного КЕД, де режими розгону і гальмування реалізуються програмами керування, які передбачають параметричне завдання зміни швидкості, самокомутація базується на використанні автоматичної зміни швидкості обертання ротора на основі інформації про переміщення, що надходить по контуру місцевого зворотного зв'язку.

Такий спосіб керування надає двигуну властивість адаптації до зміни навантаження на валу його ротора.

У дискретному ЕМПТ командний сигнал, який здійснює чергову комутацію обмоток ВЕД, формується у розподільнику імпульсів, що надходять по каналу МЗЗ у вигляді імпульсів з датчика положення ротора. Поява цього імпульсу свідчить про те, що попередня команда виконана і дискретне переміщення ротора сталося.

Основною перевагою ВЕД у порівнянні з КЕД є те, що стійкість і якість руху ЕМПТ з ВЕД залежать в основному від його структури, в той час як у розімкнутому ЕМПТ ці визначальні показники цілком залежать від параметрів КЕД та об'єктів керування, які підлягають редагуванню в обмежених межах.

Завдяки гнучкості ВЕД вдається або розширити діапазон робочих швидкостей при позиціонуванні і стеження за заданою точністю, або підвищити точність позиціонування і стеження при заданих швидкостях, або отримати граничні показники за швидкістю і точністю.

Структурна схема дискретного ЕМПТ з ВЕД будується на основі структурної схеми ЕМПТ розімкнутого типу з КЕД, з додаванням датчика положення ротора ДПР і комутуючого пристрою КП, призначеного для сполучення ДПР і ЕК.

Така схема приведена на рисунку 4.8.



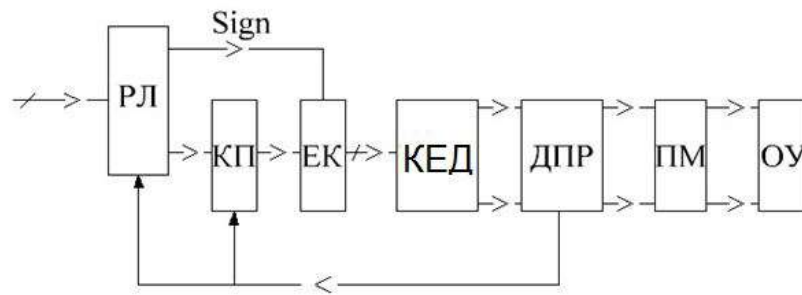


Рисунок 4.8 – Структурна схема дискретного ЕМПТ з ВЕД

Цифрова інформація, що підлягає перетворенню у переміщення, у вигляді паралельного коду вводиться до реверсивного лічильника РЛ. За наявності у ньому інформації КП підключає вихід ДПР до входу електронного комутатору ЕК, напрямок роботи якого визначається сигналом з виходу РЛ, який визначає напрямок обертання двигуна. ВЕД починає обертатися під дією імпульсів, що надходять з ДПР. Швидкість руху залежить від співвідношення моменту, що розвивається двигуном, і параметрів навантаження.

Шляхом введення випередження або відставання керуючих імпульсів, що надходять від ДПР на ЕК, можна змінювати кут комутації, який забезпечує регулювання частоти обертання ротора при розгоні і гальмуванні.

Залежно від типу застосовуваного ДПР розрізняють варіанти побудови ВЕД з імпульсним, потенційним і кодовим формуванням сигналів МЗЗ, яким відповідає зростаючий рівень структурної завадостійкості.

Розглянемо особливості роботи ВЕД. Якщо ВЕД представити у вигляді спрощеної моделі, яка містить нерухому обмотку статора у вигляді одного витка і ротора, зібраний з постійних магнітів, то для цього двигуна характерні чотири варіанти взаємного розташування магнітних осей ротора і статора:

1. Кут між магнітними осями  $\gamma = 90^\circ$  ел. момент обертання  $M = M_{\max}$ .
2. Кут між магнітними осями  $\gamma = 180^\circ$  ел. момент обертання  $M = 0$ .
3. Кут між магнітними осями  $\gamma = 270^\circ$  ел. момент обертання  $M = M_{\max}$ .
4. Кут між магнітними осями  $\gamma = 360^\circ$  ел. момент обертання  $M = 0$ .

Залежність моменту обертання  $M$  від кута  $\gamma$  показана на рисунку 4.9.

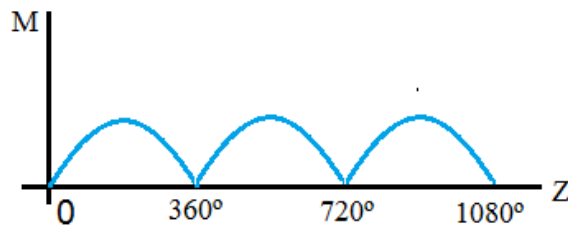


Рисунок 4.9 – Залежність моменту обертання  $M$  від кута  $Z$

Вал двигуна з'єднаний з ДПР. ДПР складається з двох нерухомих чутливих елементів ЧЕ1 і ЧЕ2 і сектора, що обертається на валу і має кут  $180^\circ$ .

Залежно від взаємного розташування чутливих елементів і сектора, включаються пари транзисторів VT1–VT4 мостового комутатора, який живить статорну обмотку.

У реальному ВЕД число секцій збільшують з метою зменшення пульсацій  $M$  і виключення положень, коли момент обертання  $M = 0$ .

Двосекційний ВЕД (рис. 4.10) можна розглядати як два односекційних двигуна із загальним ротором та із зсувом обмоток статора на  $90^\circ$ . ДПР тут має дві пари чутливих елементів, які керують чотирма транзисторними парами, які в свою чергу керують секціями обмоток. ВЕД зазвичай виконують, як і КЕД, з трифазної або чотирьохфазної обмоткою статора, зазвичай з вбудованим ДПР.

Не зупиняючись детально на вузлах ВЕД, загальних з КЕД, розглянемо принцип дії ДПР і тахогенератора ТГ, який вимірює швидкість обертання ротора. ДПР можуть бути дискретного і аналогового типу. ДПР дискретної структури видають сигнали постійної амплітуди, тривалість яких визначається кутовим розміром сектора.

Аналоговий ДПР видає безперервний сигнал зазвичай з періодом  $2\pi$ . Найбільшого поширення набули ДПР дискретного типу, до яких відносяться гальваномagnetні, індукційні і оптичні. Найбільш широко застосовуються оптичні датчики, що мають просту конструкцію у вигляді диска, який обертається з прорізами, через які здійснюється підсвічування фоточутливих елементів; це зумовлює їх високу надійність.

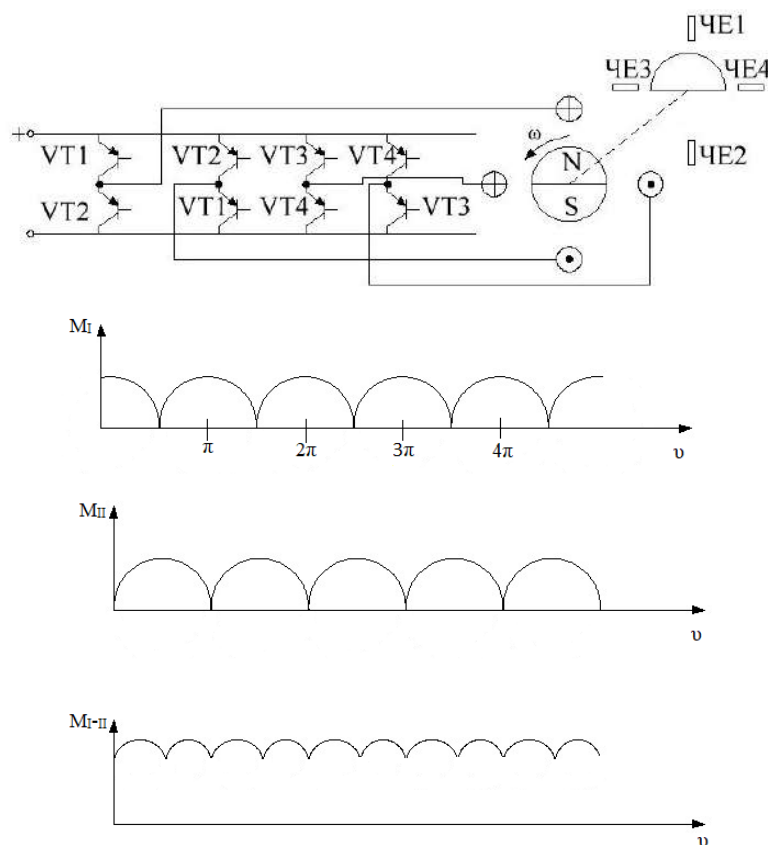


Рисунок 4.10 – Двосекційний ВЕД

Гальваномagnetні датчики виробляють сигнали низького рівня з малою крутизною фронтів. Однак поява перемикаючих мікросхем з вбудованими датчиками Холла (серія K1116), дозволяє сподіватися на їх подальше широке використання.

Не зупиняючись детально на конструкції оптичного датчика, розглянемо принцип формування сигналів керування для трифазного (шестиполусного) ВЕД. При цьому алгоритм керування візьмемо такий, коли струм одночасно протікає через дві фази ВЕД.

Для нормального функціонування силової частини приводу, необхідно на комутуючі транзистори подавати сигнали, тривалість яких визначається частотою обертання валу двигуна, але завжди становлять  $120^\circ$ . Послідовність включення обмоток визначається напрямом обертання.

Використання безконтактного ТГ, побудованого за принципом ВЕД, дозволяє отримати високі статичні та динамічні характеристики широко регулюючого електроприводу з ВЕД.

Такий ТГ має ті ж основні елементи, що і ВЕД, однак специфіка його роботи привела до того, що у нього лише два полюси, а повітряний зазор між ротором і статором більше, ніж у ВЕД, що дозволяє усунути зубцеві пульсації у кривій вихідної напруги ТГ.

Інформація про швидкість обертання ротора може бути отримана також безпосередньо від ДПР у результаті додаткового перетворення його вихідних сигналів шляхом їх диференціювання або поданням у вигляді частоти проходження імпульсів з виходу ДПР, пропорційної швидкості обертання ротора ВЕД.

У зв'язку з тим, що сучасні датчики швидкості ротора (ДШР), як правило, виконуються на основі імпульсних тахометрів, то імпульсний метод формування сигналів зворотного зв'язку набув найбільшого поширення.

При проектуванні систем позиціонування з ВЕД слід враховувати, що з метою досягнення максимальної швидкодії у початковий момент часу, відповідний початку відпрацювання необхідного переміщення, ВЕД повинен мати максимальний крутний момент для швидкого набору швидкості, а в міру наближення вихідної ланки передавального механізму, встановленого на валу ВЕД, до необхідного стану, швидкість обертання ВЕД повинна знижуватися з метою виключення можливої перекомпенсації і виникнення автоколивань.

Як зазначено вище, момент обертання ВЕД може бути заданий кутом комутації, причому оптимальний кут комутації з точки зору максимального моменту залежить від швидкості обертання ротора ВЕД.

При нульовій швидкості обертання максимальний момент обертання ВЕД відповідає нейтральній комутації (кут комутації  $\varphi = 0^\circ$ ). Однак при зростанні швидкості обертання за рахунок відставання струму від напруги в індуктивному навантаженні обмоток ВЕД, слід вводити випереджальну комутацію ( $\varphi = 45^\circ$  або  $90^\circ$ ), причому оптимальне значення  $\varphi$  залежить від

швидкості обертання. Відпрацювання переміщення проводиться на максимальній швидкості до тих пір, поки значення неузгодженості перевищує шлях, необхідний для гальмування двигуна. Для гальмування ротора кут комутації  $\phi$  повинен змінюватись у зворотній послідовності аж до гальмування противключенням. Часто для регулювання швидкості обертання ВЕД і його моменту обертання використовується широтно-імпульсна модуляція (далі – ШІМ).

### **Контрольні питання**

1. Дайте характеристику двофазним індукційним двигунам.
2. Опишіть двигуни постійного струму з незалежним збудженням.
3. Визначте поняття «крокові електродвигуни».
4. Наведіть класифікацію крокових двигунів.
5. Перелічить недоліки та переваги вентильних двигунів.
6. Наведіть структурну схему дискретного ЕМПТ з ВЕД.
7. Покажіть залежність моменту обертання  $M$  від кута  $\gamma$  ВЕД.
8. Наведіть характеристику двосекційних ВЕД.

## 5 ВИМІРЮВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ

### 5.1 Вимірювальні елементи з обмеженим діапазоном кутового переміщення

У системах передачі кута, які працюють в обмеженому діапазоні кута повороту вхідної осі, у якості вимірювальних елементів застосовують різні індукційні, індуктивні, ємнісні і потенціометричні датчики. Слід розрізняти датчики, що перетворюють кут повороту безпосередньо у напругу, і датчики, включені у мостову схему, у яких при кутовому або лінійному переміщенні рухомої частини, відбувається зміна індуктивного, ємнісного або омичного опору.

Нижче приведений короткий огляд найбільш поширених датчиків. Найбільше застосування в автоматичних пристроях завдяки високим експлуатаційним якостям знаходять *індукційні датчики*.

З індукційних датчиків найбільш поширеними є *контактні датчики електромашиного типу, слідкуючі трансформатори і мікросіни, рамні датчики кута*.

**Контактні датчики електромашиного типу.** Контактні датчики електромашиного типу мають одну вторинну обмотку.

Ротор і статор набрані з листової електротехнічної сталі і мають пази, в які закладені обмотки. На первинну обмотку подається змінна напруга  $U$  (рис. 5.1). З вторинної обмотки знімається змінна напруга  $U_{\text{вих}}$ , амплітуда якої змінюється в функції кута повороту  $\varphi$  (вихідна характеристика).

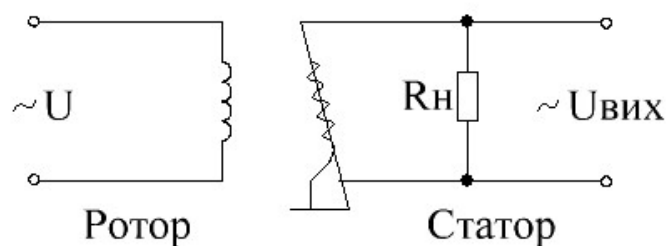


Рисунок 5.1 – Схема контактного датчика електромашинного типу

Повітряний зазор між ротором і статором має постійне значення.

Нижче наведені усереднені характеристики плоского датчика кута:

Напруга живлення, В	40
Частота напруги живлення, Гц	400
Крутизна вихідної характеристики, мВ / кут. хв	7
Залишкова (нульова) напруга, мВ	5
Максимальний реактивний момент датчика при неузгодженості ротора на кут $\pm 5^\circ$ , Н·м	$\pm 4 \cdot 10^{-6}$
Діапазон лінійної ділянки характеристики датчика, кут. град	$\pm 15$

**Слідкуючі трансформатори.** На рисунку 5.2, а наведена схема тристрижневого слідкуючого трансформатора. Первинна обмотка живиться від мережі змінного струму, а дві вторинні обмотки з'єднані зустрічно. При нейтральному положенні рухомого елемента ЕРС, яка наводяться у вторинних обмотках, однакові за значенням, внаслідок чого результуюча ЕРС на виході дорівнює нулю.

При повороті якоря від нейтрального положення відбувається збільшення магнітного потоку в одному бічному стрижні датчика і зменшення в іншому.

При цьому рівність ЕРС порушується і на виході з'являється різницева ЕРС, фаза якої залежить від знаку неузгодженості.

Відсутність контактів, малі габарити і можливість отримання великої крутості вихідної характеристики є основними перевагами слідкуючого трансформатора.

Основні характеристики слідкуючого трансформатора:

Напруга живлення, В	40
Частота напруги живлення, Гц	400
Крутизна вихідної характеристики, мВ / кут. хв	4,5
Залишкова (нульова) напруга, мВ	7
Максимальний реактивний момент датчика при неузгодженості ротора на кут $\pm 5^\circ$ , Н·м	$3 \cdot 10^{-6}$
Діапазон лінійної ділянки характеристики датчика, кут. град	$\pm 5$

Тристрижневі датчики можуть мати циліндричне виконання для зручності установки статора щодо ротора (рис. 5.2, б).

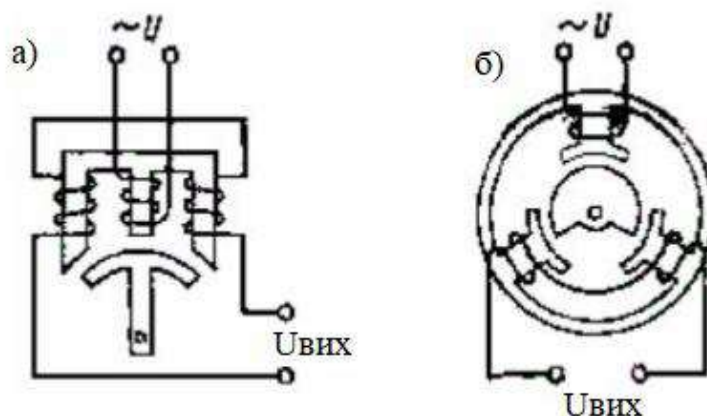


Рисунок 5.2 – Схеми слідкуючих трансформаторів: а – схема тристрижневого слідкуючого трансформатора; б – схема тристрижневого слідкуючого трансформатора з циліндричним виконанням датчиків



**Мікросін.** Статор мікросіна є симетричним чотирьохполюсним магнітопроводом і набирається з окремих пластин електротехнічної сталі (рис. 5.3).

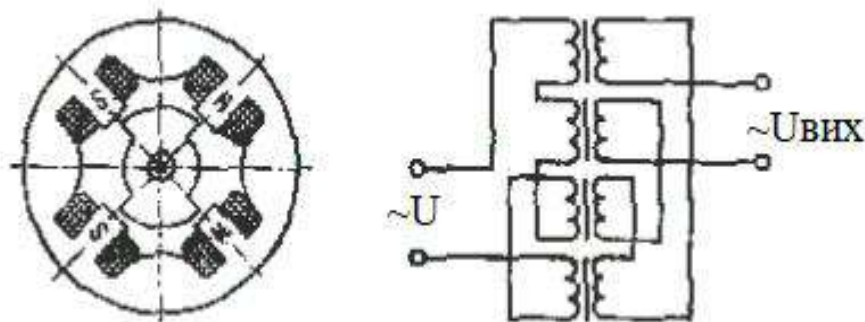


Рисунок 5.3 – Схема мікросінов

Двополюсний ротор має ширину кожного полюса  $90^\circ$ . На кожному з полюсів статора розташовані по дві котушки – первинна і вторинна. У нульовому положенні кожен полюс ротора перекриває по половині різнойменних полюсів статора.

Потоки, створювані первинної обмоткою, наводять у всіх котушках вторинної обмотки однакові ЕРС, якщо площі перекриття ротора однакові. При повороті ротора з цього положення в ту або іншу сторону з'являється ЕРС внаслідок перерозподілу потоків, створюваних котушками первинної обмотки. Фаза цієї ЕРС змінюється у залежності від напрямку повороту ротора, а значення пропорційне куту відхилення від нульового положення.

Лінійність вихідної напруги від кута повороту ротора залежить від точності дотримання геометричної форми і розмірів ротора і статора, рівномірності зазору під полюсами статора, однорідності магнітних властивостей пакетів ротора і статора, а також рівності чисел витків обмоток.

Мікросін слід застосовувати у схемах автоматики, до яких пред'являються підвищені вимоги надійності.

**Рамні датчики кута.** Рамний датчик кута складається з двох магнітопроводів 1 з обмотками збудження і рухомої рамки 2 з сигнальною обмоткою, яка розміщується у повітряному проміжку між двома магнітопроводами (рис. 5.4). Рухома рамка являє собою ізоляційну пластинку з вклеєною в неї сигнальної обмоткою у вигляді кільцевої котушки.

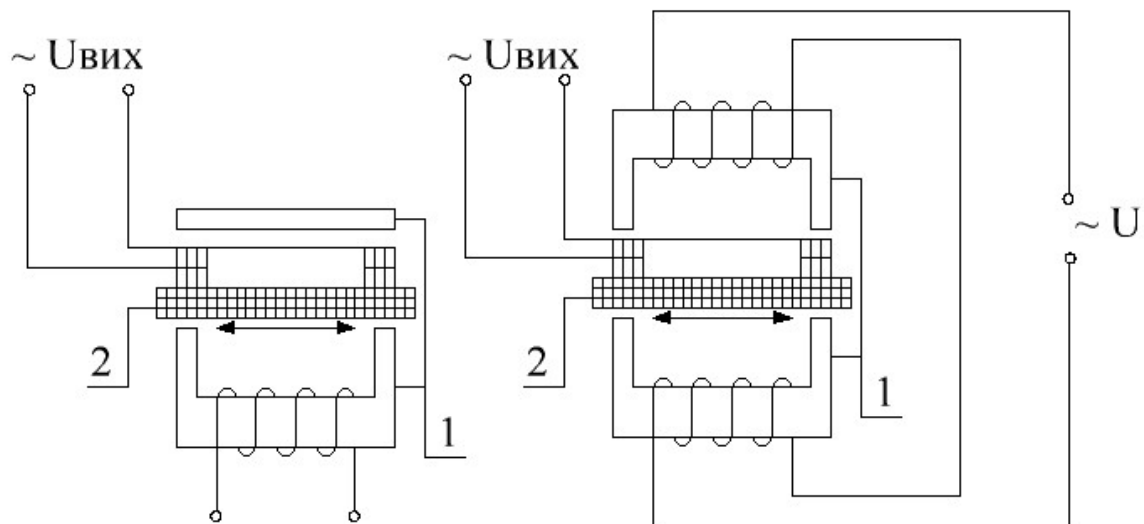


Рисунок 5.4 – Схема рамного датчика кута

При подачі на обмотки збудливої напруги  $U$  у магнітопроводі з'являється пульсуючий потік, магнітні силові лінії якого є зчепленими з сигнальною обмоткою. В обмотці буде наводитися ЕРС, пропорційна потоку.

При зміщенні рами від нейтрального положення, потік магнітопроводу зчіплюється з усіма витками обмотки і у ній наводиться максимальна ЕРС. При зміщенні рами у протилежну сторону, фаза вихідної напруги змінюється на  $180^\circ$ . Амплітуда вихідної напруги змінюється лінійно. Діапазон лінійного проміжку вихідної характеристики датчика залежить від конструкції рамного датчика. Діапазон роботи датчиків дорівнює  $\pm (3 \div 5)^\circ$ . Ротор рамного датчика поворотного типу являє собою порожнистий циліндр, на поверхні якого покладена сигнальна обмотка. Він розташований у зазорі між двома магнітами.

На зовнішньому магнітопроводі розміщується обмотка збудження. Внутрішній магнітопровід є циліндр, набраний з кіл трансформаторної сталі.

Основні характеристики циліндричного рамного датчика кута:

Напруга живлення, В	40
Частота напруги живлення, Гц	400
Крутизна вихідної характеристики, мВ / кут. хв	7
Залишкова (нульова) напруга, мВ	5
Діапазон лінійної ділянки характеристики датчика, кут. град	$\pm 40$

Головними перевагами рамних датчиків кута є безмоментність, менша чутливість до неспіввісності і биттю ротора у порівнянні з іншими датчиками. До недоліків слід віднести наявність струмопроводів і складність технології виготовлення ротора (рами) з ізоляційного матеріалу, оскільки він повинен мати малу товщину, що забезпечує малий повітряний зазор між магнітопроводами.

До датчиків, які перетворюють кут поворотного рухомого елемента у напругу, можна віднести також і звичайні **потенціометричні датчики з нульовим відведенням** (рис. 5.5).

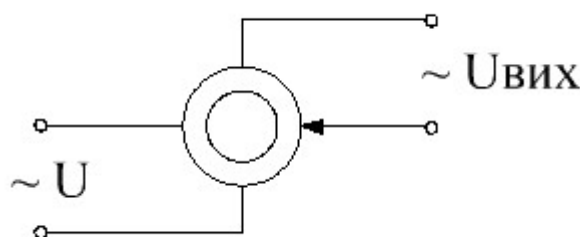


Рисунок 5.5 – Потенціометричний датчик з нульовим відведенням

Ємнісні, індуктивні, а також потенціометричні датчики зазвичай використовуються як датчики кута або переміщення і включаються мостову схему (рис. 5.6).

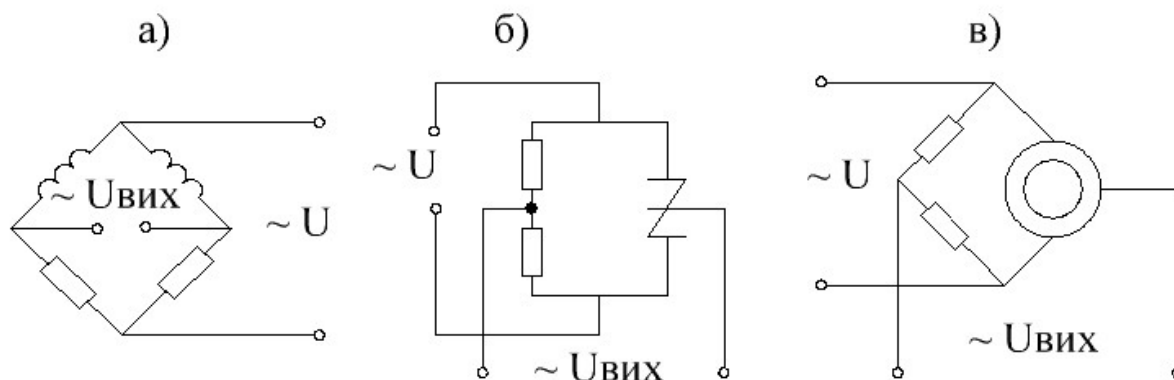


Рисунок 5.6 – Датчики кута або переміщення, включені у мостову схему:

а – ємнісні; б – індуктивні; в – потенціометричні

Індуктивність і ємність у зазначених датчиках змінюються у результаті зміни площі перекриття або зазору при переміщеннях їх рухомих елементів.

## 5.2 Сінусно-косінусні обертаючі трансформатори

Всі зростаючі вимоги до точності систем передачі, привели до використання в них сінусно-косинусних обертаючих трансформаторів (далі – ОТ) в якості датчика і приймача.

Двофазні ОТ розроблялися для обчислювальних пристроїв безперервної дії як датчики, у яких залежність вихідної напруги від кута повороту має досить мале відхилення від синусоїдального закону. Сінусно-косинусні ОТ застосовуються для вирішення широкого кола технічних завдань автоматики. Вони використовуються в аналогових обчислювальних пристроях як сінусно-косинусні перетворювачі координат (рис. 5.7), які працюють як в трансформаторному режимі з коефіцієнтом трансформації  $k$  (рис. 5.8), так і в

режимі фазообертача (рис. 5.9); в якості фазообертачів (рис. 5.10); лінійного ОТ (рис. 5.11), датчика кута і ін. Диференціальні сельсини з трифазними обмотками на роторі і статорі можуть бути замінені також синусно-косинусними ОТ.

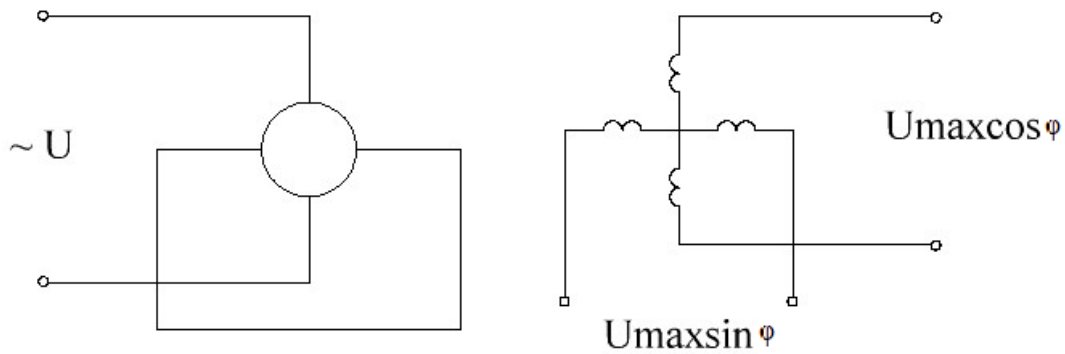


Рисунок 5.7 – Синусно-косинусні перетворювачі координат

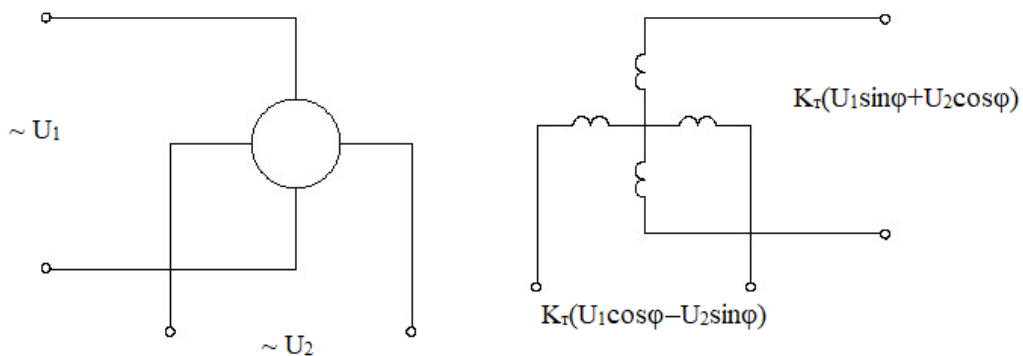


Рисунок 5.8 – Синусно-косинусний перетворювач координат, який працює у трансформаторному режимі з коефіцієнтом трансформації

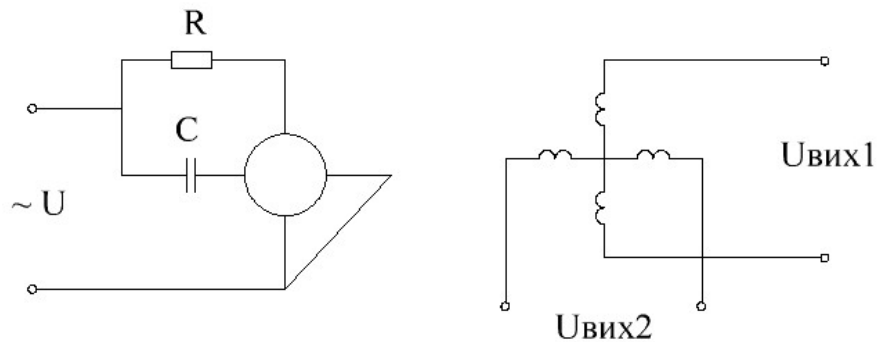


Рисунок 5.9 – Синусно-косинусний перетворювач координат, який працює у режимі фазообертача

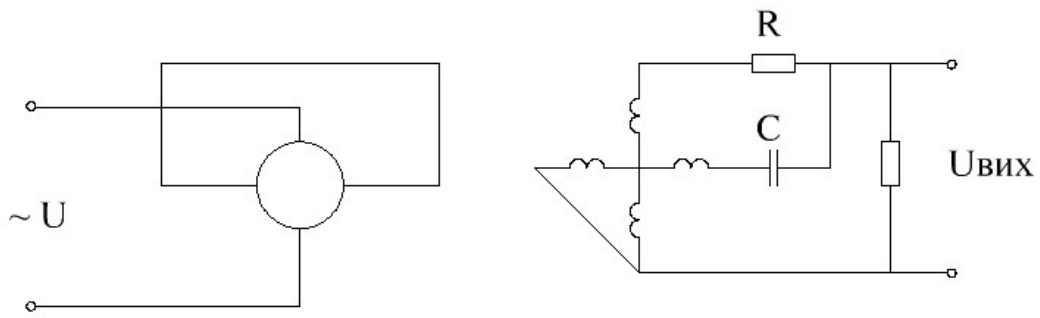


Рисунок 5.10 – Синусно-косинусний перетворювач координат в якості фазообертача

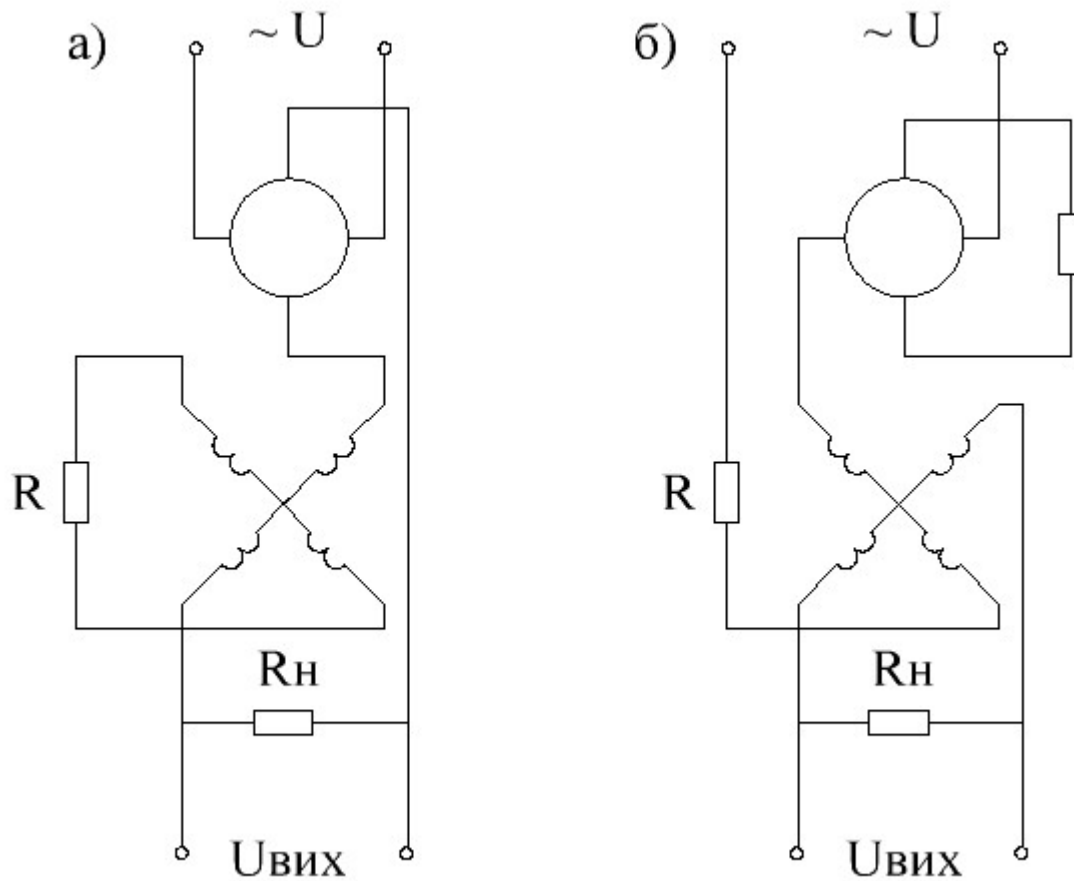


Рисунок 5.11 – Схеми лінійного ОТ: а – схема лінійного ОТ з вторинним симетруванням, б – з первинним симетруванням

З перерахованих прикладів видно, що за допомогою синусно-косинусного ОТ можна вирішувати широке коло завдань.

Обертаючі трансформатори являють собою електричні машини з неявно вираженими полюсами. Ротор і статор набрані з листової електротехнічної сталі і мають пази, в яких укладені обмотки. Повітряний зазор між ротором і статором має постійне значення.

У синусно-косинусних трансформаторах, як правило, ротор і статор мають двофазні взаємно перпендикулярні обмотки.

При подачі, наприклад, на одну з роторних обмоток напруги у вторинних статорних обмотках (рис. 5.12) наводяться ЕРС  $E_2'$  і  $E_2''$ , що змінюються при повороті ротора в ідеальному випадку по синусоїді

$$E_2' = k_T \cdot U \cdot \sin\varphi; \quad (5.1)$$

$$E_2'' = k_T \cdot U \cdot \cos\varphi, \quad (5.2)$$

де  $k_T$  – коефіцієнт трансформації;

$\varphi$  – кут повороту щодо статора.

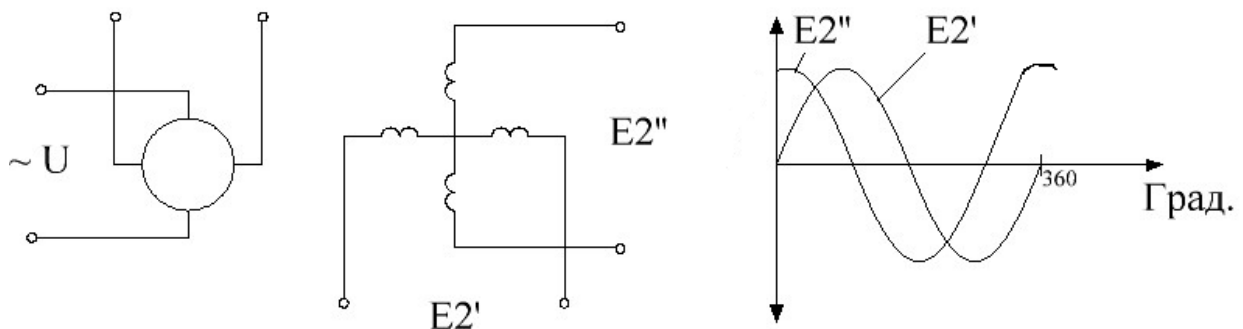


Рисунок 5.12 – Синусно-косинусний трансформатор, ротор і статор якого мають двофазні взаємно перпендикулярні обмотки

Насправді має місце відхилення форми вихідної напруги від синусоїдального закону, це обумовлене рядом технологічних і конструктивних факторів.

В даний час існують різні корпусні і безкорпусні двополюсні синусно-косинусні ОТ.

Крива похибки дистанційної передачі кута при застосуванні ОТ має в основному характер другої гармоніки і, в кращому випадку, може дорівнювати  $\pm (2-3)^\circ$ .

Такі високі точності отримані при застосуванні прецизійної технології виготовлення пакетів ротора і статора, коли намотування їх і збірка датчика здійснюється так, щоб виключити або значно послабити вплив різних чинників на характеристики ОТ.

Для подальшого підвищення точності одноканальної системи передачі кута з ОТ можуть бути застосовані різні методи компенсації похибки.

### 5.3 Модифікація обертаючих трансформаторів

Існують різновиди ОТ, що відрізняються конструктивними особливостями. До них відносяться безконтактні ОТ, ОТ рамної, тороїдального типів та ін.

На рисунку 5.13 представлений безконтактний ОТ, в якому як первинна, так і дві вторинні обмотки розташовані на пакеті статора, а ротор являє собою напівдиск. Характер зміни вихідної напруги у функції кута повороту має вигляд трикутника з лінійною ділянкою  $\pm 90^\circ$ .

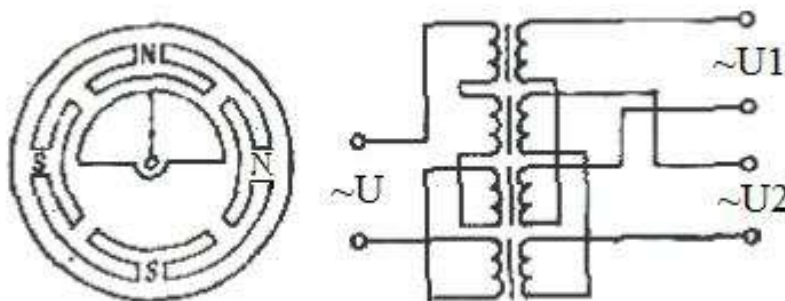


Рисунок 5.13 – Безконтактний ОТ



Такий ОТ може бути використаний як лінійний датчик. Відносна похибка відтворення лінійної залежності вихідної характеристики залежить від технології виготовлення і збірки датчика і може бути близько 2–3 %.

Такий ОТ може бути також використаний у системі трансформаторної передачі кута. Похибка передачі, природно, буде більше, ніж для ОТ звичайного типу. Для цих двополюсних ОТ похибка передачі кута в діапазоні  $360^\circ$  може перебувати, в кращому випадку, в межах  $\pm (15-25)^\circ$ .

Очевидно, що такі датчики з роторами у вигляді диска мають на осі приладу значний реактивний момент, однак простота конструкції і безконтактність є їх відмінною рисою.

У тих випадках, коли потрібно малий момент датчика ( $1 \cdot 10^{-6}$  Н·м), доцільно застосування двофазний ОТ рамного типу.

У таких датчиках первинна обмотка розташована на пакеті статора, а вторинна обмотка покладена на поверхні ротора, що представляє собою порожній циліндр з немагнітного матеріалу, який не проводить струм.

Ротор обертається у зазорі між пакетом статора (зовнішнє кільце) і внутрішнім магнітопроводом, що представляє собою набраний з кіл трансформаторної сталі циліндр. Форма кривої вихідної напруги датчиків, як правило, має велике відхилення від синусоїди.

Обертаючий трансформатор рамного типу чутливий до неспіввісності і биттю. Через великий зазор крутизна вихідної напруги мала. Обертаючі трансформатори рамного типу можуть бути виконані багатополюсними.

На рисунку 5.14 представлена схема синусно-косинусного ОТ тороїдального типу.

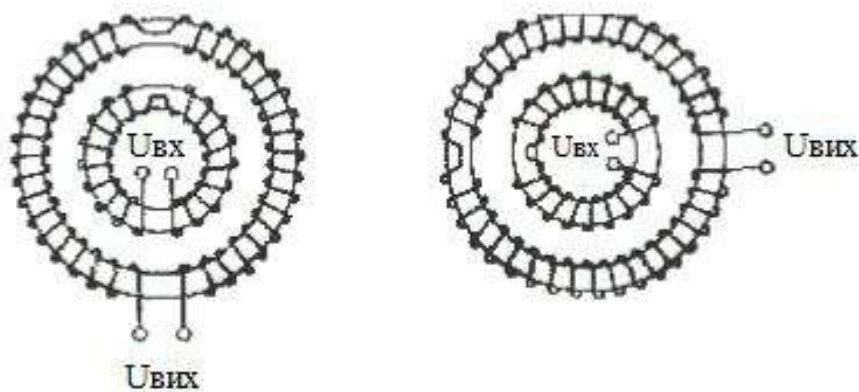


Рисунок 5.14 – Схема синусно-косинусного ОТ тороїдального типу

Ротор і статор датчика виконані у вигляді тороїдів, на яких намотані двофазні обмотки кільцевого типу.

Подібна конструкція дозволяє усунути зубцеву пульсацію.

Двофазні обмотки ротора і статора зміщені відносно один одного і намотані шарами. Перший шар утворений обмотками першої фази, а другий – обмотками другої фази.

Датчики тороїдального типу можуть бути виконані і як багатополюсні, і як двополюсні. Великий повітряний зазор і відсутність зубцевих гармонік забезпечують малий момент датчика.

#### 5.4 Лінійні обертаючі трансформатори

Синусний ОТ при малих кутах повороту ротора щодо статора може застосовуватися у якості лінійного датчика. Якщо потрібно, щоб нелінійність характеристики вихідної напруги у функції кута повороту не перевищувала 0,1 %, то кут повороту не повинен перевищувати 4,5 ° в обидві сторони від нульового положення.

Для розширення лінійного проміжку характеристики вихідної напруги проектується спеціальні синусно-косинусні ОТ, у яких відношення ЕРС вторинної обмотки до напруги, що додається до первинної обмотці, так само 0,56.

При цьому обмотки чотирьохобмоткового обертаючого трансформатора включаються за схемами, наведеними на рисунку 5.11. На рисунку 5.11, а представлена схема лінійного ОТ з вторинним симетруванням, а на рисунку 5.11, б – з первинним симетруванням.

В лінійних ОТ вихідна напруга змінюється у функції кута повороту за законом:

$$U_{\text{вих}} = f\left(\frac{\sin\varphi}{1 + k_T \cdot \cos\varphi}\right) \quad (5.3)$$

При  $k_T = 0,56$  лінійність цієї напруги буде виконуватися з точністю до 0,1 % в межах кутів  $\pm 37^\circ$  і з точністю 0,75% в межах  $\pm 60^\circ$ . Прецизійні ОТ забезпечують більшу точність.

Існують лінійні датчики типу ОТ зі спеціальною схемою обмотки. У таких датчиках лінійна залежність вихідного напруги у функції кута повороту ротора досягається тим, що обмотки ротора і статора мають коефіцієнт взаємної індукції, що змінюється лінійно у функції кута повороту ротора щодо статора. У цьому випадку лінійний проміжок характеристики датчика можна збільшити.

## 5.5 Сельсини

До останнього часу сельсини є одними з найпоширеніших елементів. Робота контактних і безконтактних сельсинів у системах передачі кута широко висвітлена у літературі, тому в даному параграфі даються лише короткий опис роботи системи передачі кута з сельсин і деякі параметри малогабаритних контактних і безконтактних сельсинів, що мають найбільшу точність.

Сельсин за конструкцією являє собою електричну машину з однофазною обмоткою збудження і трифазною вторинною обмоткою, звану обмоткою синхронізації. Залежно від конструкції обмотки збудження сельсина (однофазна), вона може розташовуватися або на статорі, або на роторі. У

малогабаритному сельсину ротор зазвичай має однофазну обмотку, а статор – трифазну. Надалі передбачається, що обмотка збудження сельсина розташована на роторі (рис. 5.15). Напруга живлення подається на роторну обмотку сельсина датчика Д. Статорні обмотки сельсина-датчика з'єднані зі статорними обмотками сельсина-приймача Пр. Наведені в обмотках статора сельсина-датчика ЕРС залежать від кутового положення його ротора. Результируючий магнітний потік сельсина-приймача, створений струмами ланцюгів синхронізації, індуктує в обмотці його ротора ЕРС, яка залежить також від його кутового положення. Величина цієї напруги залежить від кута неузгодженості між роторами сельсина-датчика і сельсина-приймача.

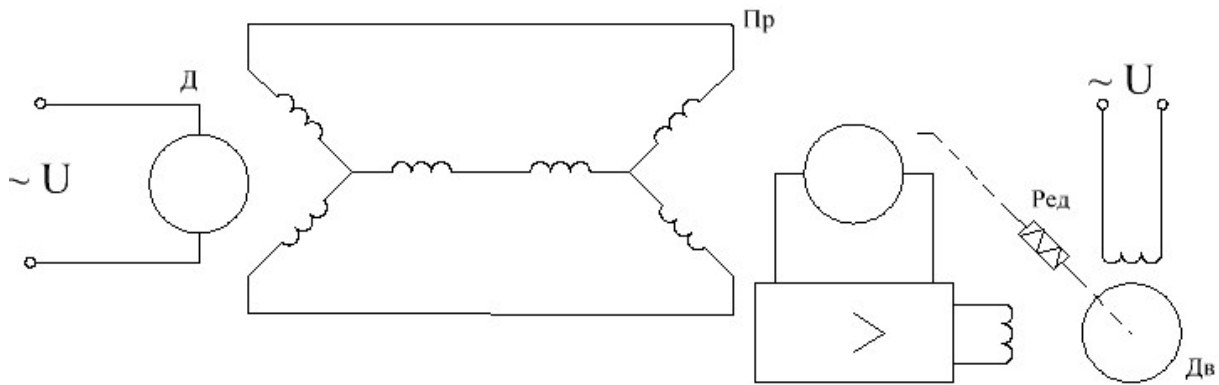


Рисунок 5.15 – Конструктивне відображення сельсина

Кут неузгодженості дорівнює різниці між кутовими положеннями ротора датчика і ротора приймача  $\beta$ , тобто  $\varphi = \beta - \alpha$ .

Магнітний потік датчика індуктує в фазових обмотках статора ЕРС:

$$E_1 = E_{\max} \sin \alpha ; \quad (5.4)$$

$$E_1 = E_{\max} \sin(\alpha - 120^\circ) ; \quad (5.5)$$

$$E_1 = E_{\max} \sin(\alpha + 120^\circ) . \quad (5.6)$$

Якщо позначити повний опір кожної фазової обмотки статора датчика і приймача через  $z$  і врахувати, що вони однакові, то струми, які протікають по них, визначаються за формулами:

$$I_1 = \frac{E_1}{2 \cdot z'} \quad (5.7)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{2 \cdot z'} \quad (5.8)$$

$$I_3 = \frac{E_3}{2 \cdot z} \quad (5.9)$$

Ці струми наводять в обмотці ротора приймача ЕРС:

$$E_1 = a \cdot I_1 \cdot \sin \beta, \quad (5.10)$$

$$E_2 = a \cdot I_2 \cdot \sin(\beta - 120^\circ), \quad (5.11)$$

$$E_3 = a \cdot I_3 \cdot \sin(\beta + 120^\circ), \quad (5.12)$$

де  $a$  – коефіцієнт пропорційності.

Сумарна ЕРС у приймачі (роторної обмотці) визначається як сума складових ЕРС:

$$U_{\text{вих}} = E'_1 + E'_2 + E'_3. \quad (5.13)$$

Після всіх перетворень маємо:

$$U_{\text{вих}} = \frac{3 \cdot a \cdot E_{\text{max}}}{4 \cdot z \cdot \cos(\beta - \alpha)}. \quad (5.14)$$

Якщо ротори датчика і приймача неузгоджені на кут  $90^\circ$ , то вихідна напруга буде:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{max}} \cdot \cos(90^\circ + \varphi) = U_{\text{max}} \cdot \sin\varphi. \quad (5.15)$$

Така залежність є більш доцільною, так як в ній при узгодженому положенні роторів вихідна напруга дорівнює нулю.

Існує ряд різних контактних і безконтактних сельсинів. Відомі також плоскі сельсини, що представляють собою окремо виконані ротор і статор.

### 5.6 Потенціометричні датчики

У системах передачі кута часто застосовуються потенціометричні датчики, які працюють і на постійному струмі. Існують потенціометричні датчики з обмеженим діапазоном роботи, кругові потенціометри з трьома і більше відводами. За конструкцією вони поділяються на одно- і багатооборотні датчики, дровові і недротяні (плівкові), а за виконуваною функцією – на лінійні, функціональні і синусні. Потенціометри дозволяють перетворювати кут повороту в напругу як при включенні мостову схему, так і безпосередньо.

Для створення систем передачі кута, що працюють в межах до  $360^\circ$ , застосовуються замкнуті кільцеві потенціометри, що мають кілька відводів. На рисунку 5.16 наведена трьох провідна схема синхронної передачі кута із зазначеним датчиком Д. Напруга живлення (постійна або змінна) подається до щіток датчика, кут повороту яких  $\varphi_1$  передається на відстань. Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  знімається зі щіток приймача Пр і подається через підсилювач на електродвигун ДВ, який відпрацьовує кут неузгодженості між кутовими положеннями щіток датчика і приймача  $\varphi_2$ .

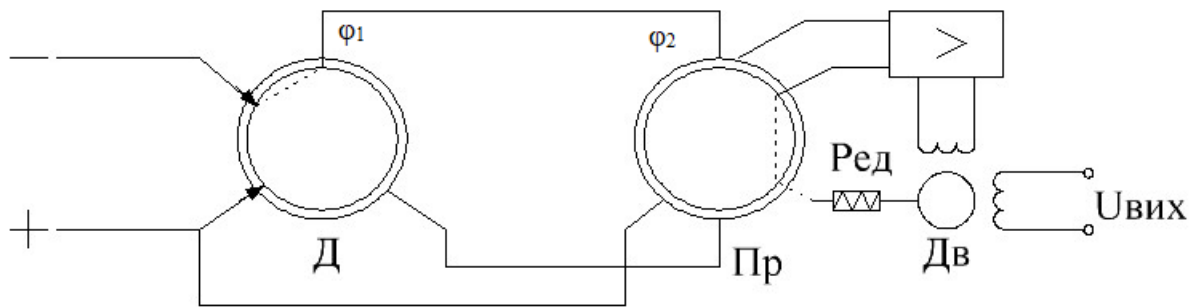


Рисунок 5.16 – Трьох провідна схема синхронної передачі кута

Вихідна напруга приймача дорівнює нулю, коли щітки приймача перпендикулярні щіткам датчика. Відомо, що помилка передачі кута з кільцевих потенціометром по трьох провідній схемі змінюється з періодом, рівним  $60^\circ$ , і досягає  $\pm 2^\circ$ . Зменшення цієї методичної помилки досягається застосуванням магнітопровідної схеми зв'язку.

Існують також недротяні (плівкові) потенціометри (рис. 5.17), які виконуються у вигляді струмопровідної плівки з родію 1, нанесеного на скло 2 з необхідною кількістю і відводів. Висока лінійність зміни опору в функції кута повороту забезпечується технологією нанесення плівки.

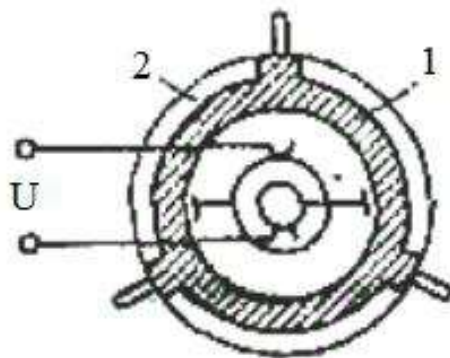


Рисунок 5.17 – Схема недротяного (плівкового) потенціометра

Якщо застосований плівковий потенціометр у системі передачі кута за трьох провідною схемою, опір датчика у функції кута повороту виконується так, щоб компенсувати методичну помилку. Монтаж потенціометра у приладах здійснюється шляхом наклейки на спеціальні металеві каркаси з колекторами.

На базі плівкових потенціометрів можуть бути створені більш прецизійні функціональні потенціометри.

### 5.7 Ємнісні перетворювачі

У тих випадках, коли необхідний малий момент перетворювача, велике передавальне відношення електричної редукції при малих габаритах, використання у середовищах, де неможливе застосування вимірювальних елементів з обмотками, можуть бути застосовані ємнісні перетворювачі, які відрізняються простотою конструкції і можливістю безконтактного знімання сигналу. Однак ємнісні перетворювачі володіють відомими недоліками, до числа яких в першу чергу слід віднести високий опір вихідного ланцюга, що збільшує вплив паразитних сигналів.

Крім того, такі перетворювачі неможливо використовувати у вологих середовищах, оскільки попадання води призводить до порушення працездатності ємнісних перетворювачів за рахунок зміни діелектричної проникності середовища.

Для ослаблення впливу паразитних сигналів, зазвичай, перший каскад підсилювача розміщують поблизу ємнісного перетворювача, а у зв'язку із застосуванням в даний час мікроелектронних елементів поблизу, може розміщуватися весь підсилювач. Попадання вологи у зазор між ротором і статором ємнісного перетворювача виключається герметизацією вузла з ємнісним перетворювачем.

Існують різні конструкції ємнісних перетворювачів, в яких відбувається зміна ємності між двома паралельними пластинами при зміні або зазору між ними, або площі перекриття пластин при кутовому або лінійному переміщеннях:

$$C = \frac{0,885 \cdot \epsilon \cdot S}{d} = \frac{0,885 \cdot \epsilon \cdot a \cdot l}{d}, \quad (5.16)$$



де  $\epsilon$  – діелектрична проникність;

$l$  – довжина пластини, см;

$a$  – ширина пластини, см;

$d$  – зазор між пластинами, см.

Відомі ємнісні перетворювачі, які використовуються у різних електричних ланцюгах або у контурах генераторів, коли зміна ємності у функції кута повороту призводить до зміни частоти струму або напруги. У слідкуючих системах застосовують диференціальні датчики, які, будучи включеними у мостову схему, перетворюють кут повороту у напругу (див рис. 5.6, а).

Такі перетворювачі можуть застосовуватися окремо як датчики кута або у системі передача кута, що працює в схемі моста, коли резистори мають змінні опори. У цьому випадку кут повороту ротора ємнісного датчика компенсується поворотом движка потенціометра до балансу моста, тобто до  $U_{\text{вих}} = 0$ .

Похибка цієї системи визначається в основному лінійностями резисторів і конденсаторів, а діапазон передачі кута менше  $180^\circ$ .

В діапазоні кута  $360^\circ$  можуть бути застосовані двох і трифазні ємнісні перетворювачі. Схема двофазного ємнісного перетворювача представлена на рисунку 5.18. У цій схемі напруга живлення подається між ротором і середніми точками резисторів  $R_1$  і  $R_2$ . Вихідні напруги  $U_1$  і  $U_2$  у разі синусоїдальної конфігурації робочої поверхні ротора змінюються у функції кута повороту за синусоїдальним законом із зсувом в  $90^\circ$  з періодом  $360^\circ$ . Такі перетворювачі можуть застосовуватися для дистанційної передачі кута спільно з синусно-косинусними ОТ. Однак похибка цієї системи значна через труднощі забезпечення технологічної рівності постійних  $C_{oi}$  і змінних  $C_{mi}$  складових ємностей:

$$C_i = C_{oi} + C_{mi} \cdot \sin\varphi. \quad (5.17)$$

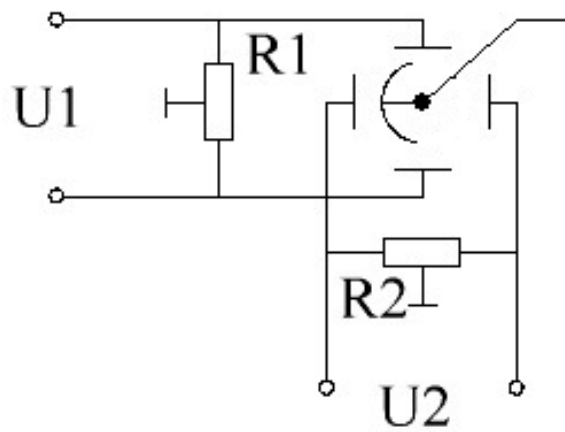


Рисунок 5.18 – Схема двофазного ємнісного перетворювача

Для підвищення точності доцільно застосування ємнісних перетворювачів з електричної редукцією, в яких відбувається осереднення цих ємностей через розподіл пластин статора по колу. При цьому необхідний вибір таких кутових розмірів пластин статора і зубців ротора, при яких можна отримати близьке до синусоїди зміну ємності у зазорі в функції кута повороту.

## 5.8 Тахогенератори

Тахогенератор є малогабаритна електрична машина-генератор, ЕРС якої у першому наближенні пропорційна швидкості обертання валу.

Тахогенератори використовуються у пристроях вимірювання швидкості, а також як елементи автоматичних пристроїв у коригувальних ланцюгах. До тахогенератора пред'являється ряд вимог:

1. Лінійність характеристики, тобто залежності ЕРС від швидкості.
2. Велика крутизна характеристики.
3. Мінімальна залишкова напруга при нульовій швидкості у тахогенераторів змінного струму і мінімальна зона нечутливості у тахогенераторів постійного струму.
4. Мінімальна фазова похибка у тахогенераторів змінного струму.
5. Мінімальні пульсації (у тахогенератора постійного струму) і синусоїдальність (у тахогенераторів змінного струму) вихідної напруги.

6. Малий момент інерції ротора і момент тертя (статичний момент).

7. Мінімальні габарити і маса.

Залежно від призначення тахогенератора і області його застосування, на перший план висуваються ті чи інші з перерахованих вимог. Так, для тахогенераторів вимірювальних пристроїв основна вимога – лінійність характеристики і мінімальна зона нечутливості. У системах керування електромашинними пристроями найважливіший показник тахогенератора – крутизна характеристики.

Тахогенератором може бути електрична машина будь-якого типу, тобто постійного струму, асинхронна і синхронна і т. д.

Тахогенератори постійного струму виконуються як малопотужні генератори з незалежним збудженням або магнітоелектричним збудженням від постійних магнітів.

Другий варіант кращий. При незалежному збудженні необхідна стабілізація струму в ланцюзі збудження через коливання напруги джерела живлення, а також з'являється додаткова похибка через непостійність опору кола збудження, обумовлена змінами температури обмотки.

Напруга тахогенератора постійного струму:

$$U_{\Gamma\Gamma} = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot r_{\text{я}} - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (5.18)$$

де  $E_{\text{я}}$  – ЕРС якоря тахогенератора;

$r_{\text{я}}$  – опір якоря;

$\Delta U_{\text{щ}}$  – падіння напруги в щітковому контакті.

При сталості магнітного потоку ЕРС генератора є лінійною функцією кутової швидкості:

$$E_{\text{я}} = C_E \cdot \Phi_{\text{о}} \cdot \omega. \quad (5.19)$$

Однак магнітний потік не можна вважати величиною постійною навіть при магнітоелектричному збудженні, так як струм в обмотці якоря створює МРС реакції якоря, що тягне за собою зменшення потоку машини:

$$\Phi = \Phi_o - \Phi_p, \quad (5.20)$$

де  $\Phi_p$  – магнітний потік реакції якоря, який у першому наближенні можна вважати пропорційним струму якоря.

Після всіх перетворень отримаємо:

$$U_{TG} = \frac{(C_E \cdot \Phi_o \cdot \tilde{\omega}) - \Delta U_{щ}}{1 + \frac{(C_E \cdot c \cdot \tilde{\omega} + r_{я})}{r_{я}}} \quad (5.21)$$

Як випливає з отриманого виразу, напруга тахогенератора – нелінійна функція швидкості. Величина  $\tilde{\omega}$  входить не тільки у чисельник, а й в знаменник. Крім того, коефіцієнт  $c$  не є строго постійним. Падіння напруги у щітковому контакті обумовлює зону нечутливості; характеристика  $U_{TG} = f(\tilde{\omega})$  виходить не з нуля. Приблизний вид характеристики тахогенератора постійного струму показаний на рисунку 5.19 (суцільна крива). Штрихами показана ЕРС  $E_{я}$ .

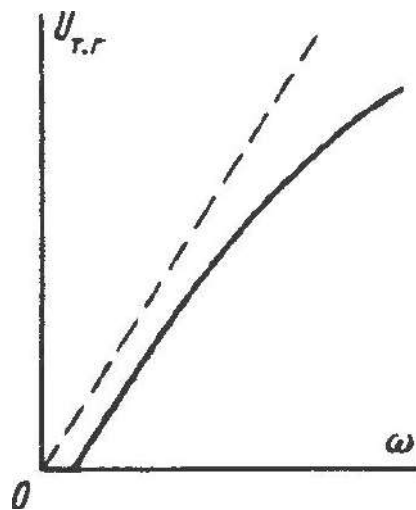


Рисунок 5.19 – Вид характеристики тахогенератора постійного струму

Крутизна характеристики визначається магнітним потоком  $\Phi_0$  і коефіцієнтом  $C_E$ , залежать від конструктивних особливостей тахогенератора, і, перш за все, від числа провідників у гільці обмотки якоря. Вплив реакції якоря послаблюється застосуванням додаткових полюсів і за рахунок повітряного зазору. З цих позицій вельми доцільний полий або гладкий якір - за типом застосовуваного в мало інерційних двигунах. Повітряний зазор у машинах з полим або гладким якорем (як правило, це машини з магнітоелектричним збудженням) завжди досить великий. У машинах з електромагнітним збудженням, навпаки, прагнуть до насичення магнітної системи, з тим щоб на роботу тахогенератора не чинили вплив ні реакція якоря, ні можливі колювання струму збудження.

Лінійність характеристики залежить від опору навантаження. При  $r_n \rightarrow \infty$  забезпечується лінійність характеристики.

Зона нечутливості, що є серйозним недоліком тахогенератора постійного струму, залежить від опору щіткового контакту. Відповідним вибором матеріалу щіток зона ця може бути значно звужена. Зокрема, в прецизійних тахогенераторах використовуються срібно-графітові щітки і навіть щітки з срібним покриттям.

До недоліків тахогенератора постійного струму відносяться також пульсації вихідної напруги, обумовлені зубцевою структурою якоря і комутацією на колекторі.

Вплив першого фактору може бути ослаблене скосом пазів і використанням безпазової структури якоря, як у малоінерційних двигунів; дію другого – збільшенням числа колекторних пластин і відповідним вибором матеріалу колекторних пластин і щіток.

Асинхронний тахогенератор (рис. 5.20) являє собою машину змінного струму з двома обмотками на статорі, зсунутими у просторі на кут  $90^\circ$ , і полим ротором, аналогічним до ротора двофазного двигуна. Одна з обмоток (обмотка збудження ОЗ) підключена до джерела змінного струму (зазвичай 50

або 400 Гц), інша (генераторна ОГ) є вихідною, і з неї знімається напруга, пропорційна швидкості.

У нерухомому роторі індуктується ЕРС  $e_{тр}$ , як у вторинній обмотці трансформатора. На малюнку штрихами показані вторинні контури. Виникаючі струми створюють поздовжній магнітний потік (по осі обмотки збудження), який надає розмагнічуючу дію, для компенсації якого струм в обмотці збудження збільшується. Так як вісь генераторної обмотки перпендикулярна осі обмотки збудження, то при нерухомій машині ЕРС у генераторної обмотці практично не індуктується.

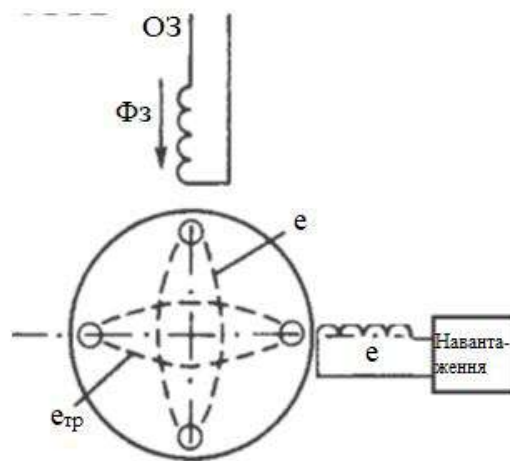


Рисунок 5.20 – Асинхронний тахогенератор

При роторі, який обертається, крім трансформаторної ЕРС в ньому виникає і ЕРС обертання  $e_{об}$ , пропорційна швидкості обертання. Максимальна ЕРС обертання генерується у контурах струму елементарних провідників на ділянках ротора, розташованих на поздовжній осі машини. Струми, що виникають у роторі, внаслідок великого активного опору ротора практично співпадають по фазі з ЕРС обертання і створюють пульсуючий потік, спрямований по поперечній осі машини.

Пульсуючий магнітний потік генерує в нерухомій генераторній обмотці ЕРС  $e_{гг}$  пропорційну швидкості обертання ротора. Частота ЕРС дорівнює

частоті живильної мережі. У зв'язку з цим асинхронний тахогенератор вельми успішно застосовується в системах, які працюють на частоті.

Реальна характеристика асинхронного тахогенератора відхиляється від лінійної (рис. 5.21). Зі збільшенням крутизни характеристики похибка тахогенератора, як правило, зростає.

Нелінійність характеристики і відповідна амплітудна похибка викликаються багатьма причинами, основні з яких: розмагнічуюча дія генераторної обмотки, навантаженої на деякий опір; відхилення поперечного потоку від осі генераторної обмотки, обумовлене індуктивним опором обмотки ротора, і зміна потоку збудження за рахунок ЕРС, яка наводиться в цій обмотці поздовжньої складової потоку ротора. Поздовжній потік пропорційний швидкості обертання ротора, і додаткова ЕРС, індуктована в обмотці збудження за рахунок обертання ротора, пропорційна квадрату швидкості. Тому похибка зменшується з пониженням робочої швидкості тахогенератора. Відповідно номінальна швидкість тахогенератора повинна складати не більше 0,6 синхронної швидкості, відповідної частоті живильного струму.

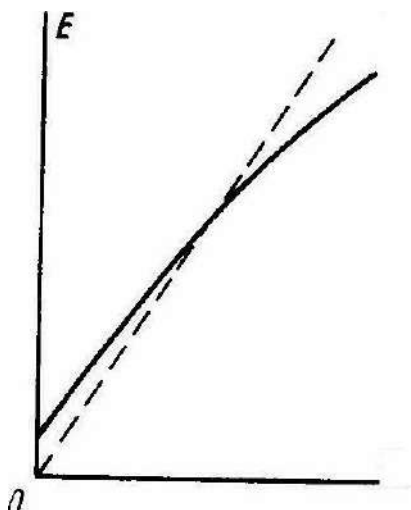


Рисунок 5.21 – Реальна характеристика асинхронного тахогенератора

Похибка асинхронного тахогенератора істотно зменшується зі збільшенням активного опору ротора.

Тому іноді ротор виготовляється не з алюмінію, як у асинхронних двигунів, а з матеріалів з великим питомим електричним опором, наприклад з фосфористої або марганцевої бронзи.

При роботі на деяке навантаження, природно, виникає ще похибка за рахунок внутрішнього падіння напруги в самому тахогенераторі.

Крім амплітудної похибки є і фазова: ЕРС генераторної обмотки виявляється зміщеною щодо напруги на обмотці збудження. При цьому фазовий зсув не постійний, а залежить від швидкості. Обидві похибки залежать також від характеру навантаження. При активно-емнісному навантаженні амплітудна похибка зменшується, а фазова збільшується.

У асинхронного тахогенератора є також температурна похибка, яка в основному пов'язана з нагріванням ротора і відповідним збільшенням його опору. Крім того, при нагріванні знижується крутість характеристики і зростає як амплітудна, так і фазова похибка.

Залишкова ЕРС у асинхронного тахогенератора обумовлена взаємною індуктивністю обмоток, причини якої в основному технологічні, як зміщення осей обмоток у просторі, що відрізняється від  $90^\circ$ , непостійність повітряного зазору по розточуванню статора, відхилення товщини стінок ротора. При нерухомому роторі залишкову ЕРС можна істотно зменшити, розміщуючи обмотки збудження і генераторну на різних ділянках магнітопроводу: одну, як зазвичай, на зовнішньому статорі, а іншу – на внутрішньому, використовуваному, в основному, для зменшення магнітного опору. Повертаючи внутрішній статор щодо зовнішнього, можна домогтися мінімальної залишкової ЕРС. Дещо менше залишкова ЕРС у багатополюсних машинах, в яких легше забезпечити магнітну симетрію. Тому асинхронні тахогенератори, як правило, виконуються з числом полюсів  $2p \geq 4$ .

Асинхронний тахогенератор застосовується не тільки для вимірювання швидкості, але і для оцінки прискорення. Обмотка збудження підключається до джерела постійного струму. При обертанні з постійною швидкістю у роторі індуктується постійна ЕРС і, відповідно, в генераторній обмотці ніякої ЕРС не



буде. При лінійно наростаючій швидкості обертання струм у роторі і, відповідно, потік уздовж осі генераторної обмотки збільшуються за лінійним законом.

Отже, в цій обмотці генерується ЕРС, пропорційна швидкості наростання магнітного потоку:

$$E = \dot{\Phi} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.22)$$

Таким чином, сигнал на виході тахогенератора пропорційний похідній від швидкості обертання ротора, тобто прискоренню.

Зіставляючи тахогенератори постійного струму і асинхронні, слід зазначити, наступні недоліки тахогенератора постійного струму, пов'язані з наявністю колектора: зона нечутливості, обумовлена падінням напруги у щітках; підвищений момент тертя; пульсації вихідної напруги; необхідність догляду за щітковим апаратом. До недоліків асинхронного тахогенератора відносяться: залишкова ЕРС при нерухомому роторі; істотні похибки і складна залежність їх від ряду факторів; більші, ніж у тахогенератора постійного струму, габарити і маса. Явна перевага асинхронних тахогенераторів – малий момент інерції.

Іноді використання тахогенератора в малопотужних системах може привести до істотного збільшення механічної інерції, а отже, електромеханічної сталої часу. У цих випадках доводиться відмовлятися від застосування тахогенератора.

Обидва типи тахогенераторів використовуються приблизно в рівній мірі.

Синхронний тахогенератор знаходить обмежене застосування. Він виконується зазвичай з магнітоелектричним збудженням. Принцип дії аналогічний принципу дії звичайного синхронного генератора. Відмітна особливість синхронного тахогенератора: зі збільшенням швидкості в ньому наростає не тільки ЕРС, а й частота. При цьому змінюється індуктивний опір,

включений в ланцюг тахогенератора, що призводить до суттєвої амплітудної похибки.

Тому в більшості випадків саме частота використовується для вимірювання швидкості обертання. Застосування синхронного тахогенератора доцільно в схемах керування, що працюють по частотному принципу. Зміна напрямку обертання при використанні однофазних тахогенераторів має виявлятися якимись додатковими засобами.

Іноді синхронний тахогенератор застосовують спільно з випрямним пристроєм. Це доцільно в тих випадках, коли пульсації напруги повинні бути мінімальними.

Використовуючи індукційний генератор з великим числом зубців (полюсів), можна отримати значну частоту на виході, а високочастотні пульсації легко відфільтрувати.

Тахогенератор в системах керування. У системах керування тахогенератор зазвичай розглядається як без інерційна ланка, а в системах, де вихідна величина – кут повороту, як ідеальний диференціатор:

$$E = k \cdot \dot{\theta} = k \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (5.23)$$

Електромагнітну інерцію ланцюга, до якої підключений тахогенератор, у разі необхідності слід враховувати додатковою аперіодичною ланкою. Індуктивний опір самого тахогенератора (у тахогенераторах постійного струму – індуктивний опір якоря) досить малий у порівнянні з активним опором обмотки.

Тому постійна часу буде в основному визначатися індуктивним опором навантаження.

## Контрольні питання

- 1 Які вимірювальні елементи з обмеженим діапазоном кутового переміщення ви знаєте?
- 2 Наведіть схему контактного датчика електромашинного типу.
- 3 Перелічить компоненти слідкуючих трансформаторів.
- 4 Із яких елементів складається схема мікросінов.
- 5 Наведіть схему рамного датчика кута.
- 6 Опишіть потенціометричний датчик з нульовим відведенням.
- 7 Поясніть роботу датчика кута або переміщення, включені у мостову схему.
- 8 Дайте характеристику синусно-косинусним обертаючим трансформаторам.
- 9 Наведіть схему синусно-косинусного перетворювача координат.
- 10 Перелічить компоненти схеми синусно-косинусного перетворювача координат, який працює у трансформаторному режимі з коефіцієнтом трансформації.
- 11 Наведіть схему синусно-косинусного перетворювача координат, який працює у режимі фазообертача.
- 12 Перелічить компоненти схеми синусно-косинусного перетворювача координат в якості фазообертача.
- 13 Наведіть схеми лінійного ОТ.
- 14 Опишіть синусно-косинусний трансформатор, ротор і статор якого мають двофазні взаємно перпендикулярні обмотки
- 15 Які модифікації обертаючих трансформаторів ви знаєте?
- 16 Дайте характеристику безконтактному ОТ.
- 17 Наведіть схему синусно-косинусного ОТ тороїдального типу.
- 18 Опишіть лінійні обертаючі трансформатори.
- 19 Визначте поняття «сельсини», принцип їх роботи?
- 20 Наведіть конструктивне відображення сельсина.

- 21 Які потенціометричні датчики вам відомі?
- 22 Наведіть трьох провідну схема синхронної передачі кута.
- 23 Перелічить компоненти схеми недротяного (плівкового) потенціометра.
- 24 Які ємнісні перетворювачі ви знаєте?
- 25 Наведіть схему двофазного ємнісного перетворювача.
- 26 Дайте характеристику тахогенераторам.

## **6 ЕЛЕКТРОННІ КОМУТАТОРИ**

### **6.1 Основні вимоги і склад**

Показники роботи КЕД в ЦСП багато в чому визначаються виконанням ЕК, який перетворює вхідну комбінацію керуючих сигналів у вихідну послідовність, необхідну для комутації обмоток двигуна відповідно до обраного алгоритму. Визначальними параметрами вхідного сигналу є тільки частота і кількість управляючих імпульсів. Амплітуда і форма вхідних імпульсів можуть змінюватися в певних межах, не порушуючи функціонування системи. Не зупиняючись детально на особливостях побудови ЕК КЕД, які детально викладені у літературі, відзначимо їх специфічні особливості стосовно ЕМТП:

- побудова ЕМТП, що передбачає застосування ПЗЗ, не вимагає установки ротора у початкове положення перед відпрацюванням. При включенні напруги живлення ЕК встановлюється в одне з довільних сталих стані;
- оскільки ЕК є елементом, що визначає надійність ЕМТП, до нього пред'являються вимоги максимальної схемної простоти, надійності та завадостійкості при мінімальній кількості елементів;

– комутатор повинен бути розрахований на роботу з довільною програмою, тому що у процесі відпрацювання можливі як гранична частота проходження імпульсів, так і тривала відсутність. Це визначає необхідність забезпечення чіткої фіксації ротора КЕД на необхідний період.

Зазвичай до складу ЕК КЕД входять наступні функціональні вузли і пристрої: розподільники імпульсів РІ, що формують необхідну циклограму природного перемикавання обмоток; пристрої електричного дроблення шагу, які виробляють багаторазовий штучний поділ основного шагу; ПП, комутуючі фазні струми обмоток; резистивні і електронні формувачі фазних струмів; вторинні джерела електроживлення, які формують необхідні для керування рівні напруги і струми.

Комутатори ВЕД містять також електронні пристрої керування вузлами зворотного зв'язку і обробки їх вхідної і вихідної інформації. Крім зазначених основних функціональних вузлів до складу ЕК КЕД та ВЕД іноді входять елементи для контролю, захисту, сигналізації і т. п.

По суті ЕК КЕД є статичним перетворювачем частоти, який виробляє м-фазну систему імпульсів напруги несинусоїдної форми. Укрупнено ЕК складається з логічної і підсилювальної частин. Схемотехніка останньої в достатній мірі універсальна, оскільки аналогічна схемотехніці ПП регуляторів для електродвигунів постійного і змінного струмів, побудова яких розглянута у відповідній літературі. Тому вони докладно не розглядаються, а торкаються питань, пов'язаних зі специфікою їх мініатюризації для ЕК.

В ЦСП розглянутого класу використовуються КЕД та ВЕД з потужністю керування до 200 Вт, для яких ЕК виконуються на транзисторах та інтегральних мікросхемах (далі – ІМС).

## **6.2 Монорежимні транзисторні електронні комутатори**

При використанні транзисторів основні зусилля в області проектування ЕК були спрямовані на спрощення його структури. Такий підхід привів до

створення транзисторного комутатора з поєднаною логікою, в якому функції розподілу, запам'ятовування і посилення суміщені в одному пристрої. На його основі була розроблена серія ЕК для чотирьох фазних КЕД з потужністю керування від 5 до 100 Вт при парному алгоритмі комутації обмоток керування. Високі енергетичні показники і стійкість цієї серії ЕК певною мірою сприяли створенню ряду дискретних розімкнутих і замкнутих ЕМТП. Завдяки першим успіхам мікроелектроніки вдалося виконати ЕК з вихідною потужністю 5 і 10 Вт в мініатюрному виконанні.

Функціональна схема такого ЕК приведена на рисунку 6.1.

Він складається з чотирьох однакових функціональних вузлів – плечей тригера (далі – ПТР), які утворюють два силових тригера, кожен з яких здійснює комутацію однієї фази КЕД.

Для забезпечення необхідної послідовності перемикання обмоток КЕД тригери з'єднані у кільце за допомогою ланцюгів зворотного зв'язку, що є імпульсно-потенційними схемами збігу, що забезпечує відповідний напрям надходження керуючих імпульсів на входи тригера. Зміна стану тригера не впливає на стан сусіднього тригера, але змінює розподіл потенціалів у ланцюгах зворотного зв'язку. Вхідні позитивні імпульси подаються за двома роздільними входами через ємності. Діод схеми збігу є одночасно розділовим елементом на вході сусіднього тригера.

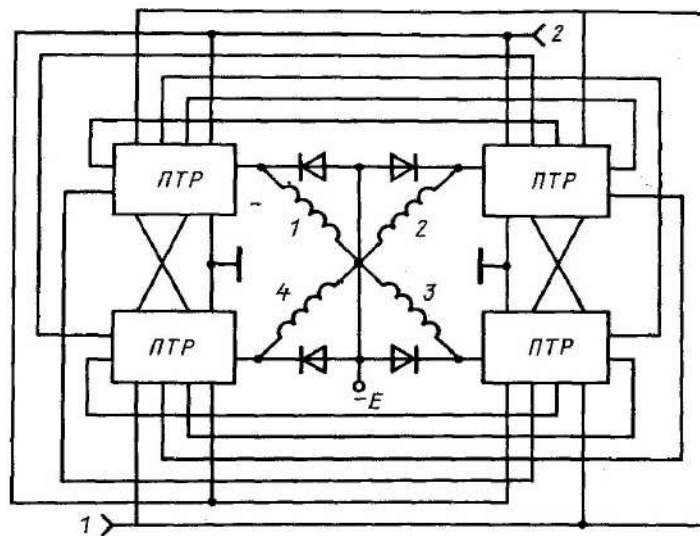


Рисунок 6.1 – Функціональна схема ЕК для чотирьох фазних КЕД

Керуючий потенціал подається з колектора транзистора через розв'язуючий резистор.

На вхід схеми збігу імпульс потрапляє в тому випадку, якщо потенціал колектора ПТР близький до нуля. Щоб вхідні імпульси виявили попередній стан тригера, момент зміни керуючого потенціалу на схемі збігу повинен бути затриманий щодо цих імпульсів. Оскільки вхідні імпульси подаються від джерела, що має низький вихідний опір, ємність конденсатора і опір резистора утворюють інтегруючий ланцюг для сигналу, який знімається з колектора. Постійні часу ланцюга заряду і розряду конденсатора вибирають з урахуванням максимальної частоти керуючих імпульсів і їхньої тривалості. Плече тригера ЕК виконано за схемою складеного ключа.

Струм двигуна проходить через обидва транзистора ПТР, причому колектор вихідного транзистора з'єднаний з обмоткою через резистор, а колектор передостаннього транзистора – безпосередньо. Таке включення забезпечує стійкий режим роботи ПТР при зміні струму навантаження, температури навколишнього середовища і напруги живлення, оскільки струм бази вихідного транзистора автоматично регулюється за рахунок зворотного зв'язку за струмом двигуна.

Зміна температури навколишнього середовища від  $-50$  до  $+70$   $^{\circ}\text{C}$  викликає дворазову зміну струму навантаження через вихідний транзистор внаслідок зміни активної складової опору обмоток КЕД. При роботі у такому широкому діапазоні температур необхідно враховувати і температурні зміни опору ланцюга зворотного зв'язку.

Для забезпечення працездатності ЕК цей опір вибирають, виходячи з умов створення режиму насичення вихідного транзистора при найменшій температурі. Якщо значення температурних коефіцієнтів опорів (далі – ТКО) навантаження і елемента зворотного зв'язку сумірні, то напруга зворотного зв'язку в усьому діапазоні температур залишається практично незмінною. При підвищенні температури зменшується струм навантаження і зростає коефіцієнт посилення транзисторів за струмом, що викликає збільшення ступеня

насичення вихідних транзисторів і призводить до зростання втрат в їх вихідних ланцюгах. Елемент зворотного зв'язку повинен мати негативний ТКО, сумірний з ТКО обмотки керування КЕД.

Збільшення потужності комутації досягається паралельним включенням вихідних транзисторів. З метою вирівнювання струмів елементи зворотного зв'язку включені в колекторні ланцюги кожного вихідного транзистора (рис. 6.2).

При проектуванні серії ЕК враховані вимоги забезпечення завадостійкості у ланцюзі джерела живлення. Колекторні опору тригера ЕК мають мінімально можливе значення, яке визначається значенням активної складової опору обмотки КЕД. Максимальна перешкодозахищеність комутатора досягається у результаті виключення прискорюючих ємностей і підвищення напруги зсуву.

Конструктивно такий ЕК виконаний у вигляді вузла, що складається з чотирьох гібридних інтегральних мікросхем (далі – ГІС).

Один з можливих шляхів мініатюризації ЕК з поєднаною логікою полягає у використанні при його реалізації інтегральних матричних структур, які містять у стандартному корпусі ІМС набори активних і пасивних елементів. Число елементів в корпусі ІМС кратне чотирьом, що зручно для чотиритактного ЕК. Перспективність використання матричних структур в ЕК для КЕД та ВЕД визначається тим, що плече тригера при роздільній побудові ЕК може бути використано у якості підсилювача потужності (далі – ПП).



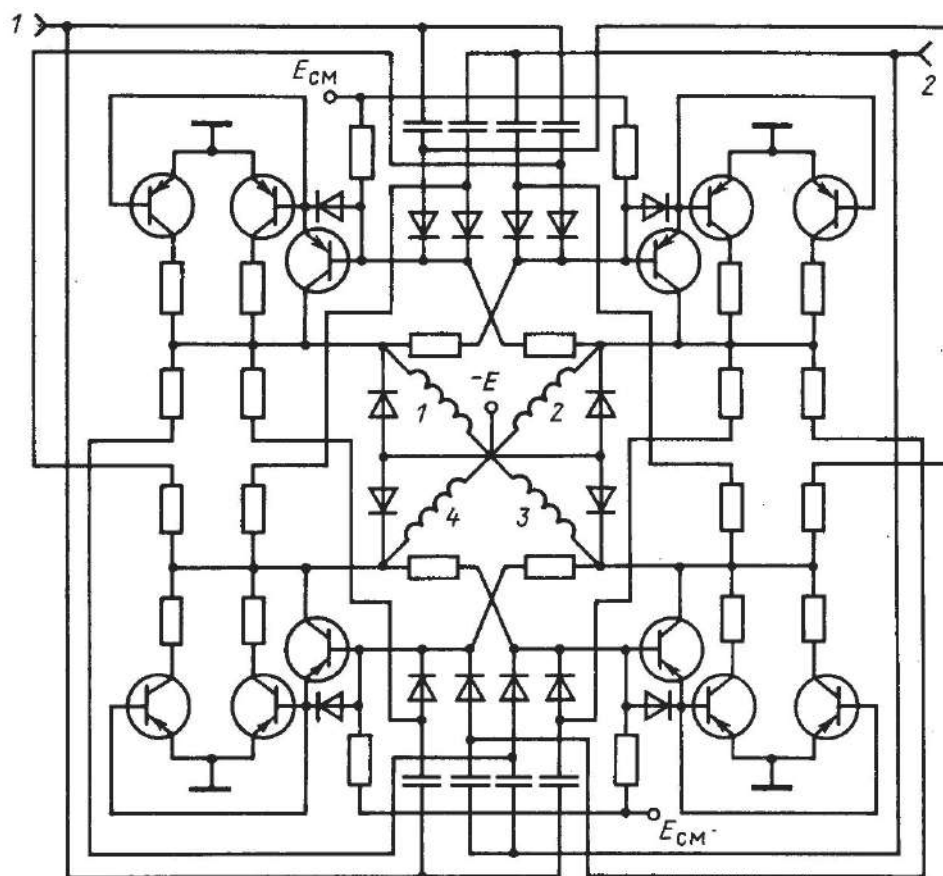


Рисунок 6.2 – Функціональна схема ЕК з паралельним включенням вихідних транзисторів

Функціональна схема матричного ЕК (рис. 6.3) складається з двох силових тригерів, кожен з яких здійснює комутацію однієї фази КЕД. Плече тригера виконується на основі транзисторної матриці (далі – ТМ). Вибір конкретного типу матриць визначається полярністю джерела живлення КЕД.

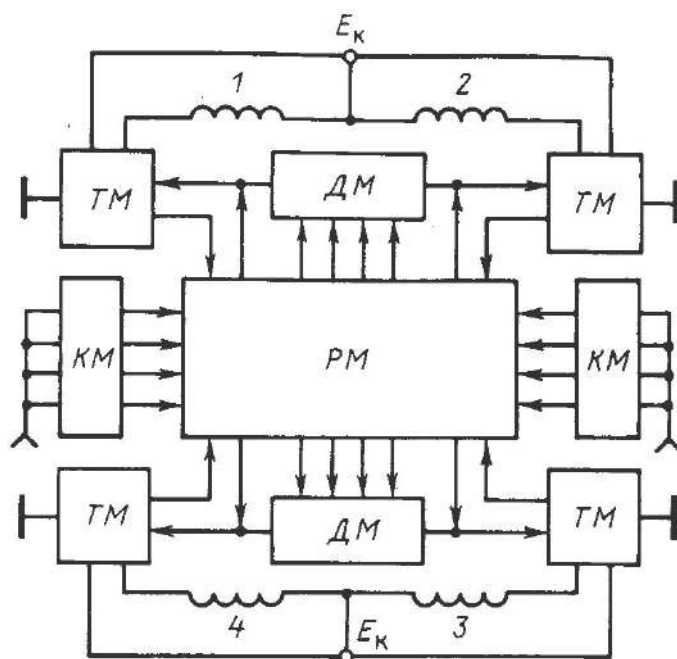


Рисунок 6.3 – Функціональна схема матричного ЕК

Широка область застосування ТМ визначається не тільки високими електричними характеристиками приладу, його малими габаритними розмірами при значній потужності, яка розсіюється, а й особливостями його конструкції: роздільними виводами всіх електродів чотирьох структур, електричною ізоляцією всіх електродів від корпусу збірки, що дозволяє значно підвищити допустиму розсіювану потужність без збільшення габаритних розмірів ЕК за рахунок їх розміщення на конструкційних вузлах приладів, використовуваних в даному випадку в якості тепловідводу. Для більш рівномірного розподілу теплових втрат при всіх режимах роботи КЕД слід враховувати періодичність у роботі ключових елементів ЕК. З цією метою необхідно в кожне ПТР включати транзистори, які знаходяться у різних корпусах. Це особливо важливо при паралельному включенні декількох транзисторів на одну обмотку керування.

Всі елементи, що входять до конденсаторної (далі – КМ), діодної (далі – ДМ) і резистивної (далі – РМ) матриці, однотипні, і кількість їх в корпусі кратно чотирьом. Це створює не тільки певні переваги технологічного характеру, а й дозволяє ці ж елементи використовувати при створенні ЕК КЕД

підвищеної надійності з по елементним дублюванням, в яких кожен елемент замінюється четвіркою елементів, з'єднаних послідовно-паралельно.

До недоліків розглянутих монорежимних ЕК на основі транзисторного комутатора з поєднаною логікою відносяться обмежені функціональні можливості, що виключають виконання на його основі ЕК для КЕД з числом обмоток, кількість яких відрізняються від чотирьох. Усунення цього обмеження пов'язане з поділом логічної і вихідної частин ЕК. Однією з неодмінних умов успішного вирішення цього завдання є комплексна мініатюризація, яка передбачає виконання ЕК у вигляді ГІС.

### **6.3 Монорежимні розподільники на ІМС**

Своєрідність завдань, які вирішуються багатотактним РІ, часто не дозволяє безпосередньо використовувати відомі принципи побудови пристроїв обчислювальної техніки на ІМС.

Аналіз розробок в області багатотактних монорежимних ЕК показує, що їх поліпшення може бути досягнуто за рахунок подальшого вдосконалення схемотехніки, кращого використання потенційних можливостей цифрових ІМС.

Перш за все, це відноситься до РІ, які є основним елементом розглянутих далі ЕК на ІМС.

У схемотехніці ЕК широко використовуються розподільники, виконані на основі двох інтегральних JK-тригерів, замкнених у кільце перехресними зворотними зв'язками з виходів одного тригера на входи іншого через логічні схеми 2І-2АБО-НІ. Наявність інверторів у ланцюгах зворотного зв'язку, відносна складність самого тригера і його обмежені функціональні можливості, привели до пошуків інших шляхів побудови РІ для ЕК.

Більш просте схемне рішення РІ (рис. 6.4) було отримано при застосуванні в ньому інтегральних D-тригерів. Працює РІ наступним чином. Нехай на шину напрямку 2 подано потенціал логічної 1, а на шину напрямку 3 потенціал логічного 0. Припустимо, що перед приходом першого імпульсу по

шині тактів 1 тригери T1 і T2 знаходяться у стані 1, тобто на виході Q – потенціал логічної 1, а на виході notQ – потенціал логічного 0. При цьому на вихідних шинах 4–7 розподільника є комбінація потенціалів 1010 і на D-вхід тригера T2 надходить потенціал логічного 0, а на D-вхід тригера T1 – потенціал логічної 1.

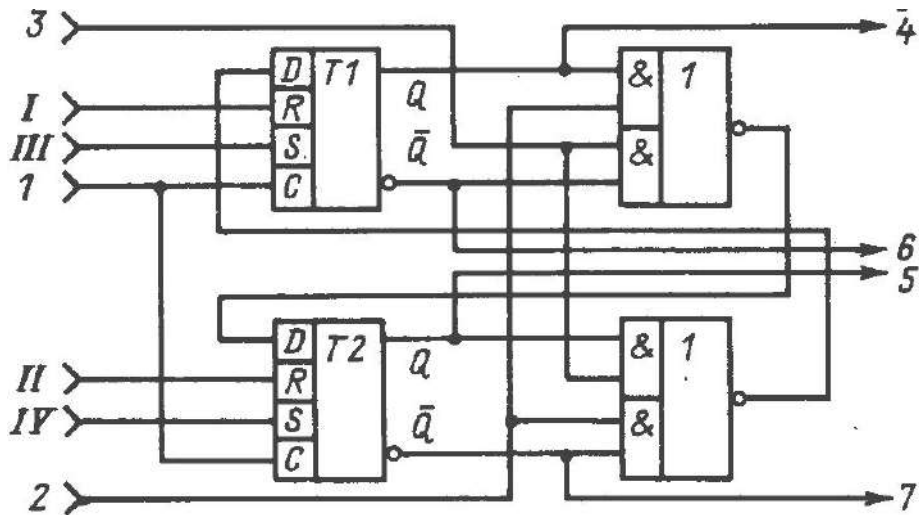


Рисунок 6.4 – Функціональна схема РІ

По фронту першого імпульсу, який прийшов по шині тактів 1, тригер T2 переходить у стан логічного 0, якому відповідав би на виході Q потенціал логічного 0, а на виході Q – потенціал логічної 1. При цьому на вихідних шинах 4–7 розподільника встановлюється комбінація потенціалів 1001 і на D-входи тригерів T1 і T2 надходять потенціали логічних 0. По фронту другого імпульсу, який прийшов по шині тактів 1, тригер T1 переходить у стан логічного 0, а тригер T2 не змінить свого стану. При цьому на вихідних шинах 4–7 розподільника встановлюється комбінація потенціалів 0101, на D-вхід тригера T2 надходить потенціал логічної 1, а на D-вхід тригера T1 – потенціал логічного 0.

По фронту третього імпульсу, який прийшов по шині тактів 1, тригер T1 не змінює свого стану, а тригер T2 переходить в стан логічної 1. При цьому на вихідних шинах 4–7 розподільника встановлюється комбінація потенціалів 0110 і на D-входи тригерів T1 і T2 надходить потенціал логічної 1.

По фронту четвертого імпульсу, який прийшов по шині тактів 1, тригер T1 переходить в стан логічної 1, а тригер T2 не змінює свого стану. При цьому на вихідних шинах 4–7 розподільника встановлюється комбінація потенціалів 1010, тобто розподільник встановлюється у початковий стан. З приходом наступних імпульсів по шині тактів 1 цикл роботи розподільника повторюється.

При подачі на шину напрямку 3 потенціалу логічної 1 на вихідних шинах 4–7 РІ має місце зворотний порядок чергування кодових комбінацій: 1010-0110-0101-1001- 1010 -...

Таким чином, при надходженні на шину тактів 1 вхідної послідовності імпульсів і подачі на шину напрямку 2 потенціалу логічної 1 на вихідних шинах 4–7 розподільника формується пряма, а при перемиканні потенціалу логічної 1 на шину напрямку 3-зворотна послідовність імпульсів, відповідна 4-тактній парній комутації 4-обмоточного КЕД.

У ряді випадків необхідні якісні та кількісні показники ЕМТП з 3- і 4-фазними КЕД досягаються використанням 6- і 8-тактних алгоритмів комутації, тобто шляхом природного дроблення шагу при чергуванні елементарного і неелементарного алгоритмів комутації. Для їх реалізації при незмінній силовій частині, яка містить т каналів – по числу обмоток керування , потрібен розподільник, який забезпечує 2 т станів.

#### **6.4 Багаторежимні електронні комутатори крокових електродвигунів**

Для реалізації мікро програмного керування, що передбачає зміна алгоритму комутації КЕД при фіксованому способі керування, використовується багаторежимний електронний комутатор (далі – БЕК). Зміна алгоритмів комутації проводиться шляхом впливу по входу або виходу РІ потенційними сигналами, що подаються по командним шинам.

Побудови БЕК, що передбачають завдання алгоритмів впливом щодо виходу РІ, базуються на використанні властивості повноти елементарного

алгоритму. Необхідні перетворення вихідних сигналів РІ виробляються комутатором алгоритмів КА.

Цей принцип реалізується дворезимним ЕК КЕД (рис. 6.5). Багаторезимний електронний комутатор містить РІ (рис. 6.4), дешифратор на логічних схемах збігу 8-11, комутатор, алгоритмів, що містять логічні схеми 2І- 2АБО-НІ 14-17 і ПП 18-21. Напрямок обертання двигуна визначається подачею потенційного сигналу на шини 2 або 3 РІ.

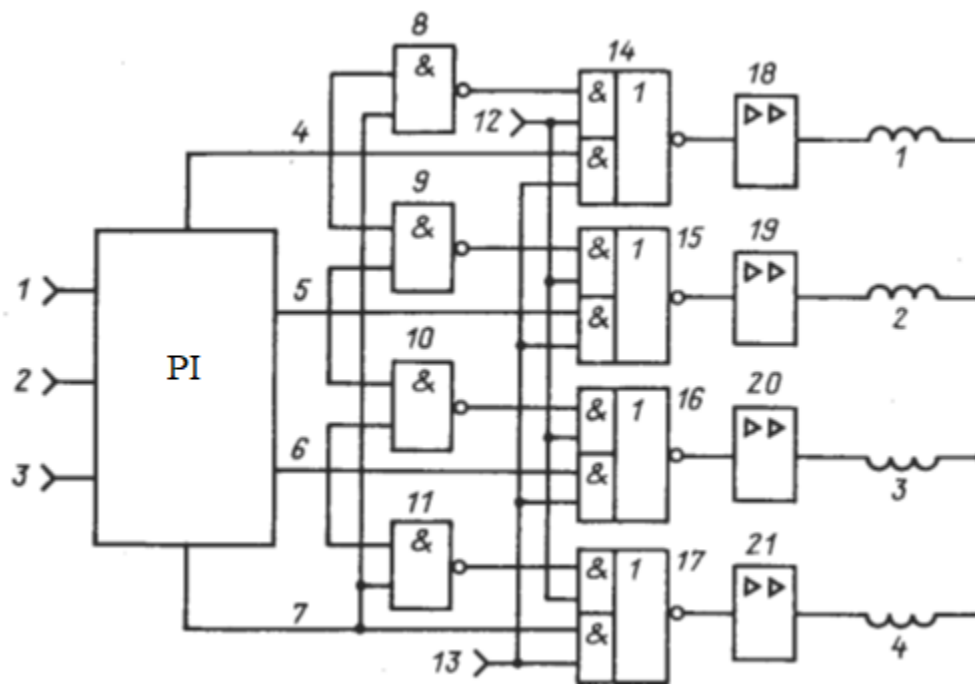


Рисунок 6.5 – Функціональна схема дворезимного ЕК КЕД

При надходженні імпульсів керування на шину на виходах 4–7 РІ формується 4-канальна послідовність імпульсів, тимчасова розстановка яких відповідає алгоритму парної комутації обмоток КЕД. Ця послідовність перетворюється дешифратором у послідовність, відповідну елементарному алгоритму. Необхідний алгоритм комутації ЕК на виході задається подачею дозволяючого потенціалу на командну шину 12 алгоритму послідовної комутації, або на командну шину 13 алгоритму парної комутації. Зняття дозволяючого потенціалу з обох командних шин призводить до замикання в ПП, тобто відключення двигуна від мережі.

Введення до складу БЕК тригера тактів і формувача алгоритмів дозволяє реалізувати 8-тактну комутацію, тобто повніше використовувати можливості мікропрограмного керування.

## 6.5 Полірежимні електронні комутатори крокових та вентильних електродвигунів

Принципи, покладені в основу побудови моно- і багаторежимних ЕК для КЕД дозволяють реалізувати полірежимні електронні комутатори (далі – ПЕК), які забезпечують оперативну зміну способу керування електродвигуном в ЕМТП.

Одним з основних елементів ПЕК є РІ (рис. 6.4). Перевага цієї побудови – у можливості реалізації паралельного введення інформації МЗЗ. При роботі від ДПР інформація надходить у вигляді позиційного коду по шинах I–IV на відповідні R і S – входи D-тригерів, на виходах Q і notQ яких, як і в режимі покрокового керування, формується 4-канальна послідовність імпульсів, взаємна розстановка яких відповідає алгоритму парної комутації КЕД. Такий РІ є в достатній мірі універсальним і може бути використаний для керування КЕД та ВЕД.

Узагальнена структурна схема ВЕД з таким різновидом ПЕК представлена на рисунку 6.6.

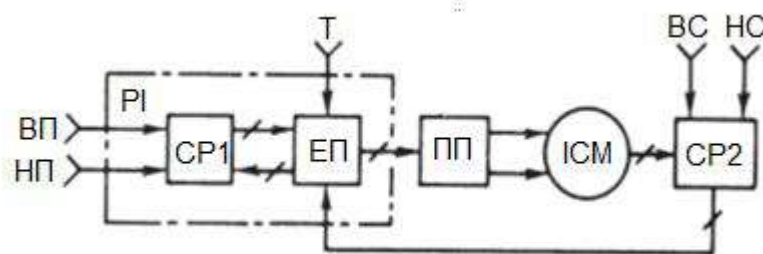


Рисунок 6.6 – Узагальнена структурна схема ВЕД

У неї входять РІ, ПП, схема реверса СР2 і ІСМ, яка містить електродвигун з ДПР. Необхідно нагадати, що до складу РІ входить своя схема реверса СР1, виконана на логічних елементах 2І-АБО-НІ, яка логічно передує елементу пам'яті ЕП, виконаному на D-тригерах. Реверс електродвигуна у режимі самокомутації здійснюється в контурі МЗЗ схемою реверсу СР2, а при покроковому керуванні – СР1.

Відповідно до узагальненої схемою (рис. 6.6) можуть бути реалізовані т-фазні ВЕД. Напіврежимний електронний комутатор для них будується на основі РІ монорежимних ЕК.

Для ВЕД з парним числом фаз досить подати сигнали з виходу СР2 ВЕД на S-входи відповідних D-тригерів і припинити подачу імпульсів на шину 1.

Зміна способу керування електродвигуном здійснюється шляхом подачі на відповідні входи ПЕК (рис. 6.6) потенційних сигналів вперед (ВП) і назад (НП) покрокового керування, вперед (ВС) і назад (НС) самокомутації. При покроковому управлінні тактові імпульси надходять на вхід Т РІ.

Неоднакова тактність комутації при різних режимах роботи виявляється корисною при роботі з індуктивними КЕД, що мають зони параметричного резонансу на основній комутації при покроковому управлінні.

Для випадків, коли алгоритм комутації повинен залишатися незмінним при переході з одного режиму роботи на інший, наприклад при застосуванні магнітоелектричного КЕД, може бути рекомендована функціональна схема ПЕК, представлена на рисунку 6.7а, в якій використовується принцип автономного реверсування для кожного способу керування (рис. 6.6), а елемент пам'яті виконаний на D-тригерах, тактованих фронтом. Автономність дозволяє розглядати роботу в кожному з режимів окремо. Зміна способу керування проводиться сигналами, аналогічними зазначеним на рисунку 6.6.



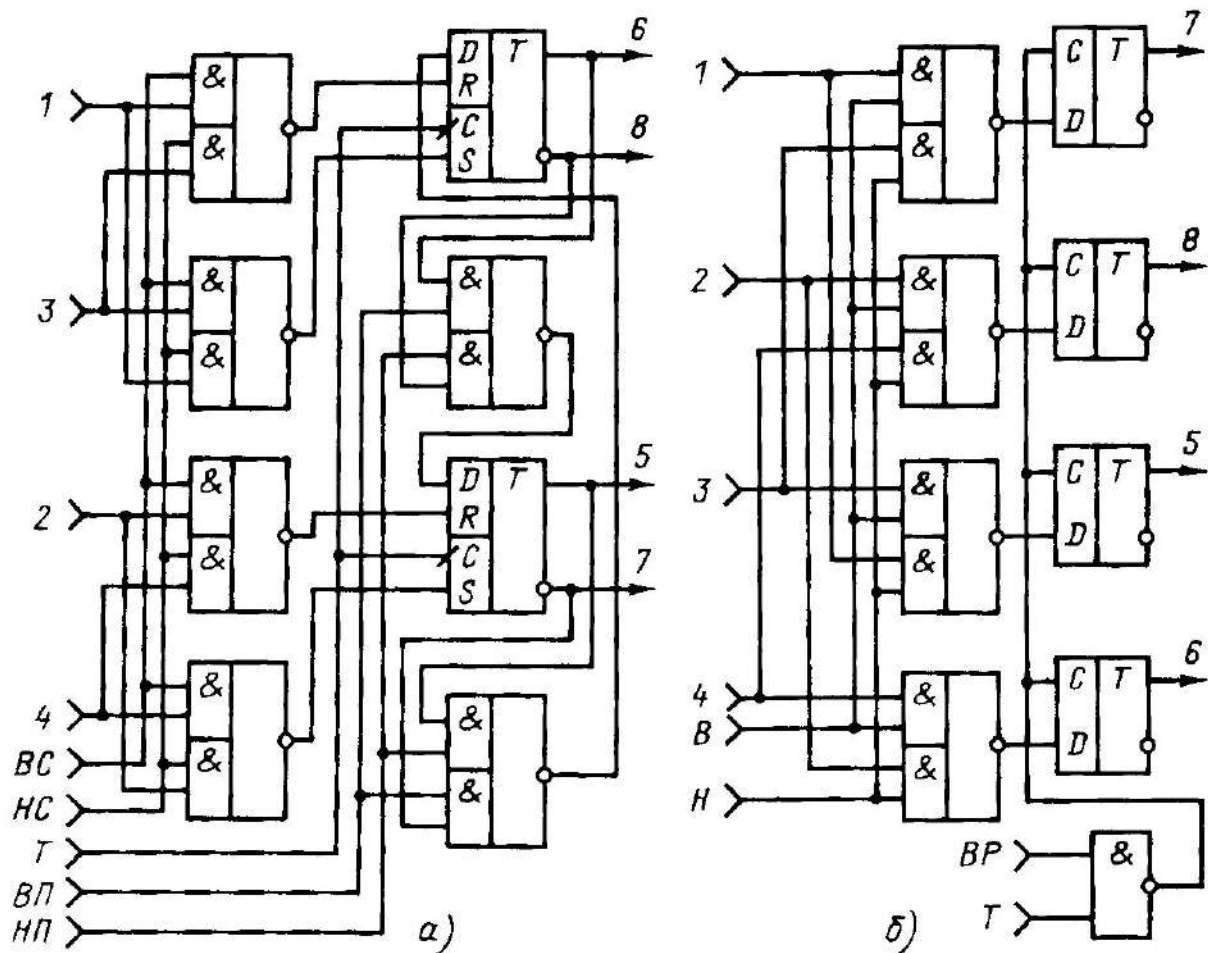


Рисунок 6.7 – Функціональна схема ПЕК з принципом автономного реверсування

У режимі ВЕД генератор імпульсів зазвичай відключається, а перемикання тригерів елемента пам'яті відбувається за сигналами ДПР. При досягненні ротором ВЕД певних положень на виходах ДПР здійснюється зміна кодової комбінації, відповідно до якої тригери перемикаються таким чином, щоб забезпечити безперервне обертання ротора ВЕД шляхом включення відповідних комбінацій його обмоток.

Слід зазначити, що нормальна робота в режимі ВЕД може здійснюватися і без відключення генератора імпульсів.

Для роботи у цьому режимі досить подати потенціал логічної 1 на будь-який з входів ПЕК для самокомутації (BC або HC). Побудова пристрою в цьому випадку забезпечує пріоритет проходженню сигналів від ДПР. Відсутність

сигналів на обох входах напрямків самокомутації відповідає роботі пристрою у режимі покрокового керування за сигналами генератора імпульсів, що надходять на вхід Т ПЕК. Ця властивість виявляється корисним у пристроях, які передбачають автоматичну зміну режимів.

Перехід у схемі елемента пам'яті на D-тригери, тактовані рівнем, дозволяє не тільки спростити ПЕК, але й зробити його більш універсальним. При такому виконанні ПЕК (рис. 6.7б) можна змінювати алгоритм комутації. Для цього достатньо змінити послідовність сигналів на виході ДПР. Важливою перевагою є і те, що такий принцип побудови ПЕК може бути використаний при будь-якому числі фаз ВЕД.

На відміну від варіанту ПЕК, структурна схема якого представлена на рисунку 6.6, а функціональна – на рисунку 6.7а, завдання способу керування електродвигуном у варіанті ПЕК, представленому на рис. 6.7б, проводиться логічним рівнем сигналу на вході вибору режиму (ВР). Вибір напрямку переміщення здійснюється шляхом подачі потенційних сигналів на входи вперед (В) і назад (Н) ПЕК, на тактовий вхід Т якого надходять імпульси керування при покроковому керуванні.

### **Контрольні питання**

1. Які монорежимні транзисторні електронні комутатори ви знаєте?
2. Опишіть функціональну схему ЕК для чотирьох фазних КЕД.
3. Дайте характеристику функціональній схемі ЕК з паралельним включенням вихідних транзисторів.
4. Поясніть функціональну схему матричного ЕК.
5. Опишіть монорежимні розподільники на ІМС.
6. Наведіть функціональну схему РІ.
7. Поясніть багаторежимні електронні комутатори крокових електродвигунів.

8. Перелічить компоненти функціональної схеми дворежимного ЕК КЕД.
9. Опишіть полірежимні електронні комутатори шагових електродвигунів та вентильних електродвигунів.
10. Наведіть узагальнену структурну схему ВЕД.
11. Наведіть функціональну схему ПЕК з принципом автономного реверсування.

## **7 ПІДСИЛЮВАЛЬНО-ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ЕМС**

### **7.1 Вихідні дані для проектування підсилювачів**

Підсилювачі є одним з основних ланок ЕМС і служать для посилення сигналу неузгодженості за напругою і потужністю до величини, достатньої для керування виконавчим двигуном і відпрацювання кута неузгодженості з необхідною чутливістю. Відомі різні типи підсилювачів: напівпровідникові, магнітні, електромашинні, релейні і т. д.

В даний час у малопотужних ЕМС застосовуються, головним чином, напівпровідникові підсилювачі, які мають малу масу і габарити, володіють високою економічністю, довговічністю, надійністю. Недоліком напівпровідникових елементів є залежність їх параметрів від температури, однак він долається різними схемними рішеннями.

Основними методами стабілізації режиму і параметрів напівпровідникових підсилювачів є термокомпенсація і негативний зворотний зв'язок.

При виборі і проектуванні підсилювачів вихідними даними є:

– параметри джерела сигналу – вихідний опір вимірювального елемента, величина залишкової (нульової) напруги, крутизна і початковий фазовий зсув вхідного сигналу;

- параметри навантаження – тип навантаження, опір, фазовий зсув, споживана потужність;
- коефіцієнт посилення, постійна часу, стабільність вихідної напруги по амплітуді, фазі;
- структурна схема всього підсилювального пристрою, спосіб реверсування і керування;
- вимоги, що пред'являються до параметрів коригувальних ланцюгів, параметрів модулятора і демодулятора;
- спеціальні та експлуатаційні вимоги.

При розрахунку слідкуючих систем необхідно мати величини коефіцієнта посилення і постійної часу підсилювача. Зазвичай інерційність підсилювача залежить від типу обраного підсилювального пристрою. Найменшою інерційністю мають напівпровідникові підсилювачі.

## **7.2 Напівпровідникові підсилювачі**

У малопотужних ЕМС найбільшого поширення набули підсилювачі з напівпровідниковими транзисторами, що володіють малою масою і габаритами, високим ККД, великим терміном служби, малим споживанням енергії, малою постійної часу.

На практиці прийнято розділяти підсилювачі на попередні каскади і на підсилювачі потужності.

До підсилювача потужності ставляться такі вимоги:

- підсилювач повинен забезпечувати нормальний режим живлення обмотки керування двигуна;
- вихідний опір підсилювача має бути, за можливістю, малим та вибраний з урахуванням характеристик двигуна;
- коефіцієнт посилення за потужністю повинен бути великим для отримання меншого коефіцієнта посилення попереднього підсилювача; ККД

підсилювача потужності повинен бути великим, так як підсилювач є одним з основних споживачів енергії.

Основним видом навантаження для кінцевих каскадів підсилювачів змінного струму є обмотка керування двофазного індукційного двигуна. Потужність, споживана обмоткою керування, складається з активної і реактивної складових, причому тільки активна складова потужності робить корисну роботу, а підсилювач повинен бути розрахований на повну потужність. Реактивна складова викликає лише додатковий нагрів транзисторів вихідного каскаду і вимагає збільшення номінальної потужності цього каскаду.

Реактивну складову потужності керування можна компенсувати шляхом включення конденсатора паралельно або послідовно з обмоткою керування. Тоді обмотка керування (разом з конденсатором) буде чисто активним навантаженням для підсилювача.

Потужність керування є максимальною у пусковому режимі, тобто при нерухомому роторі двигуна і максимальній напрузі на обмотці керування. Ємність компенсуючого конденсатора вибирається виходячи з параметрів ланцюга керування у пусковому режимі, відповідно і підсилювач розраховується на вихідну потужність, відповідну пусковому режиму.

Потужність, споживана обмоткою керування навіть малопотужних двофазних двигунів, становить кілька ват.

Тому застосування кінцевих каскадів у режимі класу А виключається через низький ККД.

Кінцеві каскади повинні працювати у режимі класу В або у режимі перемикачів (клас Д).

Практичні схеми кінцевих каскадів у режимі класу В можуть бути різноманітними, але найбільшій увазі заслуговують схеми, в яких транзистори можуть бути змонтовані на загальному радіаторі, з'єднаному одним з полюсів джерела живлення. Це дозволяє при живленні від бортової мережі не ізолювати радіатор від маси (корпусу), що спрощує конструкцію підсилювача і підвищує його надійність.

Схема такого вихідного каскаду з трансформаторним зв'язком наведена на рисунку 7.1.

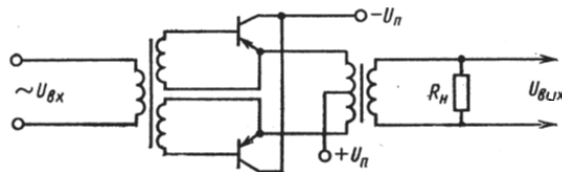


Рисунок 7.1 – Схема вихідного каскаду з трансформаторним зв'язком

Зв'язок закінченого каскаду підсилювача з обмоткою керування двигуна може бути здійснена за допомогою трансформатора, автотрансформатора або без трансформатора.

Для зменшення габаритів і маси підсилювача завжди кращий безтрансформаторний зв'язок. Необхідність у застосуванні трансформатора чи автотрансформатора виникає з причин:

- невідповідності між максимальною вихідною напругою каскаду і необхідною напругою керування;
- невідповідність між кількістю виводів вихідного ланцюга каскаду і кількістю виводів обмоток керування.

Після вибору схеми каскаду і виду зв'язку трансформаторів з обмоткою керування двигуна необхідно виконати наступні розрахунки:

1) вибрати тип трансформатора за значенням допустимої зворотної напруги і допустимого колекторного струму;

2) визначити можливість застосування даного типу транзисторів на основі енергетичного і теплового розрахунків. При цьому може виникнути потреба у паралельному включенні транзисторів. Зробити розрахунок радіаторів, якщо вони необхідні;

3) по статичним характеристикам визначити максимальну напругу база-емітер і струм бази. Ці величини визначають максимальну потужність, споживану вхідним ланцюгом каскаду, тобто є вихідними даними для розрахунку предкінцевого каскаду;

4) провести конструктивний розрахунок трансформатора або автотрансформатора.

Загальний принцип розрахунку каскадів підсилювача полягає у визначенні амплітуди напруги і струму вихідного кола виходячи із заданої потужності у навантаженні, після чого визначається необхідний режим транзистора і необхідні амплітуди напруги і струму у вхідному ланцюзі каскаду. Останні дані є вихідними для розрахунку вихідного ланцюга попереднього каскаду.

Іноді для отримання необхідної постійної часу підсилювача вводяться додаткові коригувальні контури.

Призначення каскадів попереднього посилення — посилення слабких коливань напруги або струму, що надходять від джерела сигналу, до певної заданої величини.

Остання визначається значенням струму або напруги, яке необхідно подати на вхід кінцевого каскаду для отримання заданої потужності у навантаженні.

Каскади попереднього посилення прийнято класифікувати за характером навантаження у вихідному ланцюзі.

Найбільше застосування знаходять підсилювачі на резисторах.

Значно рідше застосовуються підсилювачі на трансформаторах.

За способом підключення сигналу і навантаження до електродів транзистора схеми підсилювачів поділяються на схеми: із загальною базою, із загальним емітером, із загальним колектором (емітерний повторювач).

Схеми попередніх підсилювачів зазначених типів добре відомі, реалізовані у мікросхемному виконанні з широкою номенклатурою і описані у теоретичній і довідковій літературі по електроніці. На рисунку 7.2 приведена схема підсилювача змінного струму, працюючий на двофазний двигун.

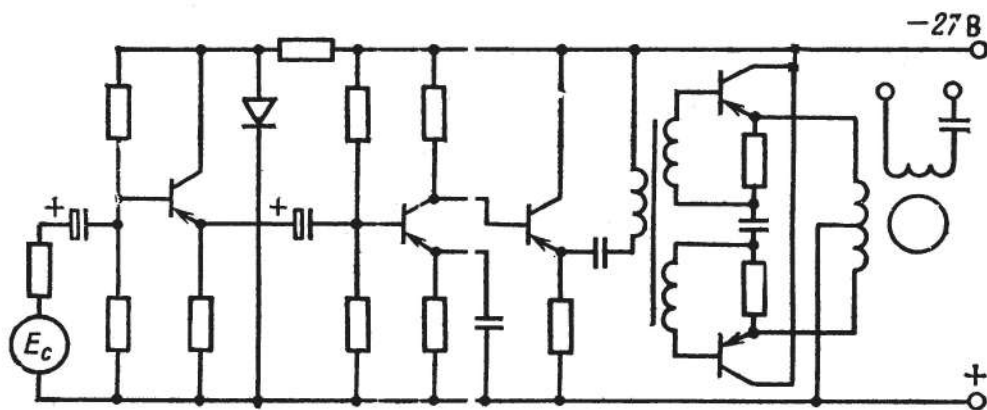


Рисунок 7.2 – Схема підсилювача змінного струму, працюючий на двофазний двигун

Істотне підвищення технічного рівня електронної апаратури досягається шляхом її мініатюризації на основі розвитку функціонально-вузлового методу конструювання і використання інтегральних мікросхем. Завдяки таким перевагам, як висока надійність, малі габарити і енергоспоживання, порівняно невисока вартість, виробництво інтегральних схем отримало широкий розвиток.

Перехід до широкого застосування мікросхем в апаратурі дозволив не тільки підвищити якість апаратури в цілому, але і прискорити терміни її розробки та виготовлення, уникнути ряду традиційних незручностей, в тому числі налаштувань і підстроювань, властивих збірці вузлів і блоків на навісних елементах. Інтегральна технологія дозволяє істотно зменшити фізичні розміри транзисторів, діодів, резисторів і з'єднань між ними. Однак це можливо лише на базі структурної мініатюризації підсилювачів, яка зводиться насамперед до повного виключення зі складу підсилювачів низької частоти трансформаторів і до граничного скорочення конденсаторів великої ємності. Ілюстрацією застосування принципів структурної мініатюризації підсилювачів змінного струму може служити схема, наведена на рисунку 7.3.



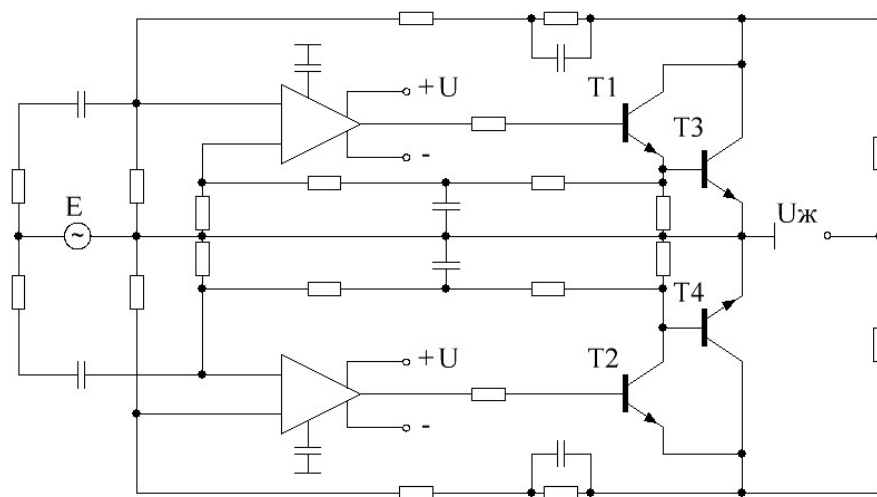


Рисунок 7.3 – Схема структурної мініатюризації підсилювачів змінного струму

Принцип побудови такого підсилювача покладений у відповідному поділі підсилювального тракту у вхідному ланцюзі на два самостійних канали. Кожен канал представляє собою підсилювач, керуючий своїм транзистором двотактного вихідного каскаду. Диференціальний вхід інтегрального підсилювача дозволяє отримати необхідні фазові співвідношення на вході кінцевого каскаду. У цьому підсилювачі, за винятком вхідного ланцюга і ланцюга стабілізації режиму інтегрального підсилювача постійного струму, відсутні будь-які інші комплексні ланцюги.

Всі елементи схеми, включаючи і навантаження, пов'язані між собою гальванічно. Розглянутий підсилювач призначений для роботи на ряд двигунів від ДГ-0,1 до ДГ-1, розміщений у корпусі розміром  $35 \times 25 \times 4$  мм.

### 7.3 Підсилювачі постійного струму

Іноді виникає необхідність у посиленні сигналів, які змінюються дуже повільно. Підсилювачі таких сигналів називаються підсилювачами постійного струму (далі – ППС).

Неможливість застосування у схемі реактивних елементів створює значні труднощі при побудові багатокаскадних підсилювачів, так як виключається

ємнісний і трансформаторний зв'язки між каскадами. Гальванічний зв'язок між каскадами здійснюється не тільки для підсилювання сигналу, але і для ланцюгів зсуву, що ускладнює встановлення необхідного режиму у кожному каскаді.

Особливістю ППС є вимога виключно високої стабільності режиму, так як будь-яка зміна режиму сприймається як зміна сигналу. Основними характеристиками ППС є коефіцієнт посилення за струмом або напругою і стабільністю режиму підсилювача.

При відсутності сигналу напруги (струму) на виході, підсилювач має деяке початкове значення, яке приймається за нульовий. Неконтрольована зміна цієї напруги, наприклад при зміні температури, називається дрейфом нуля.

Стабільність режиму ППС прийнято оцінювати значенням дрейфу нуля, наведеного до входу підсилювача. Таким значенням вважається відношення найбільшої зміни напруги на навантаженні, обумовленої нестабільністю режиму, до коефіцієнта посилення підсилювача. Дрейф нуля на вході підсилювача повинен бути значно менше напруги сигналу.

Дрейф буває тимчасовим і температурним. Для зменшення дрейфу у ППС з гальванічним зв'язками застосовують балансні (диференціальні) підсилювачі і підсилювачі з термокомпенсацією. Під термокомпенсацією розуміють застосування спеціальних температурно-залежних схемних елементів, які сприяють зменшенню температурного дрейфу. Такими елементами можуть бути або термістори, або напівпровідникові діоди.

В даний час в якості ППС в основному використовуються інтегральні мікросхеми - операційні підсилювачі.

Освоєння промисловістю інтегральних операційних підсилювачів серій К140, К153, К544 і т. п. мають зсув нуля, наведений до входу, рівний одиницям мілівольт і сотень мікрівольт по напрузі і десяткам наноампер за струмом, і незначний дрейф цих параметрів.

У деяких випадках для зниження зміщення нуля і його дрейфу використовуються схеми ППС з модуляцією вхідного сигналу (рис. 7.4).

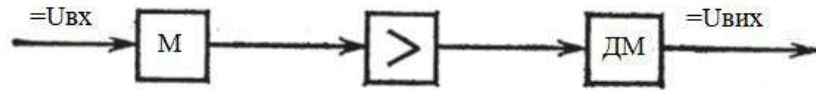


Рисунок 7.4 – Схема ППС з модуляцією вхідного сигналу

В якості модуляторів використовуються в основному інтегральні переривники, які мають високі точні параметри.

Сигнал постійного струму перетворюється спочатку у пропорційний йому сигнал змінного струму (за допомогою модулятора М), потім підсилюється підсилювачем змінного струму, а потім знову перетворюється у сигнал постійного струму (за допомогою демодулятора ДМ).

#### 7.4 Тиристорні перетворювачі

В даний час для керування потужними двигунами постійного і змінного струму (від 1 до 100 кВт і вище) широко застосовуються тиристорні (вентильні) перетворювачі, які їх замінюють, зокрема, електромашинні підсилювачі у системах електроприводу і в слідкуючих системах.

Тиристорний перетворювач являє собою нелінійну дискретну імпульсну систему, в якій пристрій фазового керування є імпульсним елементом, який перетворює безперервну функцію вхідного сигналу в дискретну функцію моментів відкривання тиристорів. Широке застосування тиристорних перетворювачів обумовлено такими найважливішими властивостями, якими володіють тиристори:

- високою питомою потужністю (на одиницю маси або об'єму);
- малими внутрішніми втратами, тобто високим ККД;
- широким діапазоном робочих температур (від  $-40$  до  $+120$  °С);
- відсутністю обертових або зношувальних частин;
- безшумністю;

- миттєвою готовністю до роботи;
- малим часом відмикання і відновлення замикаючих властивостей;
- високим коефіцієнтом посилення по потужності.

Пристрій, який змінює кут включення тиристорів в залежності від рівня вхідної керуючої напруги, називається фазоімпульсним пристроєм або системою фазового керування. Для того щоб отримати на виході більш згладжену криву випрямленої напруги, застосовують багатофазні схеми.

У схемах керування тиристорами сигнал керування порівнюється з лінійно наростаючою опорною напругою і в момент їх рівності формувач імпульсу видає імпульс заданої тривалості, необхідний для включення тиристора.

Як джерело опорної напруги найбільшого поширення набули генератори пилкоподібної напруги, в яких для узгодження фази і частоти проходження імпульсів опорна напруга синхронізується напругою живлення.

Основне призначення тиристорного перетворювача (далі – ТП) в системах реверсивного і нереверсивного електроприводів постійного струму полягає в перетворенні змінної напруги мережі живлення в регульовану постійну напругу для живлення ланцюгів якоря і обмотки збудження електричних машин в функції вхідного сигналу.

Тиристорний перетворювач є складним нелінійним імпульсним елементом, який має нестандартну форму вихідного імпульсу (частина синусоїди) і здійснює складну модуляцію вихідних імпульсів – щось середнє між широтно-імпульсною і амплітудно-імпульсною модуляцією.

## **7.5 Модулятори**

До перетворювальних елементів підсилювачів слідкуючих систем відносяться модулятори і демодулятори. Модулятори призначені для перетворення повільно мінливих сигналів постійного струму, одержуваних від вимірювальних пристроїв, у напругу змінного струму, амплітуда якої

пропорційна миттєвим значенням напруги сигналу, а фаза змінюється на  $180^\circ$  при зміні полярності напруги сигналу.

Модулятор являє собою нелінійний шестиполіусник, основним елементом якого є переривник, тобто пристрій, внутрішній опір якого змінюється в певних межах з частотою комутуючої (опорної) напруги. В якості переривників у модуляторах, які застосовуються в слідкуючих системах, використовують напівпровідникові діоди і транзистори, електромагнітні вібратори, магнітні підсилювачі, фотодіоди і фоторезистори і т. д. Найпростішим модулятором електромеханічного типу є вібраційний перетворювач, який являє собою поляризовану електромагнітну систему з котушкою, якорем і нерухомими контактами. Котушка живиться змінним струмом, якір вібує з частотою джерела живлення і замикає контакти. В даний час застосовуються рідко.

Для схем модуляторів і демодуляторів широко застосовуються напівпровідникові ключі, які володіють у порівнянні з віброперетворювачами і магнітними підсилювачами, рядом позитивних властивостей: малими габаритами і масою, великим терміном служби, можливістю виготовлення з серійних елементів і т. д.

Схеми модуляторів на напівпровідникових елементах можна розділити на одно- і двонапівперіодні. Найпростіша однонапівперіодна схема модулятора на напівпровідникових діодах показана на рисунку 7.5.

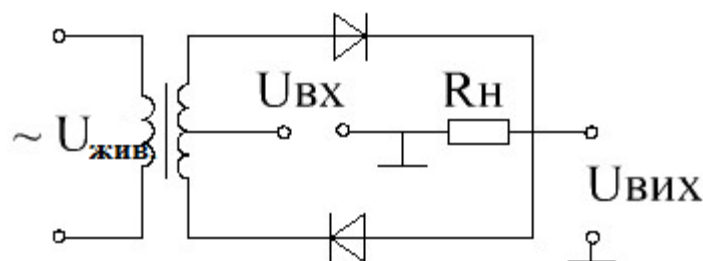


Рисунок 7.5 – Однонапівперіодна схема модулятора  
на напівпровідникових діодах

Для отримання великого коефіцієнта передачі застосовуються двонапівперіодні модулятори. На рисунку 7.6 приведена схема кільцевого діодного модулятора. Підключаючи конденсатор в цій схемі до обмоток вихідного трансформатора, можна утворити контур для виділення основної гармоніки у вихідній напрузі. У кільцевій схемі протягом кожного напівперіоду опорної напруги працюють по два діоди. Коефіцієнт перетворення такої схеми в 2 рази вище, ніж у однонапівперіодній, і дорівнює приблизно 0,9. Модулятори на діодах можна використовувати для перетворення напруги досить високого рівня (починаючи від десятків мілівольт). Вони мають дрейф нуля, який викликається нестабільністю показників діодів під дією температури і напруги живлення. Проте застосування високо стабільних кремнієвих діодів дозволяє зменшити дрейф. Зокрема, кільцевий модулятор на кремнієвих діодах є одним з найнадійніших і стабільних модуляторів, які застосовуються в слідкуючих системах.

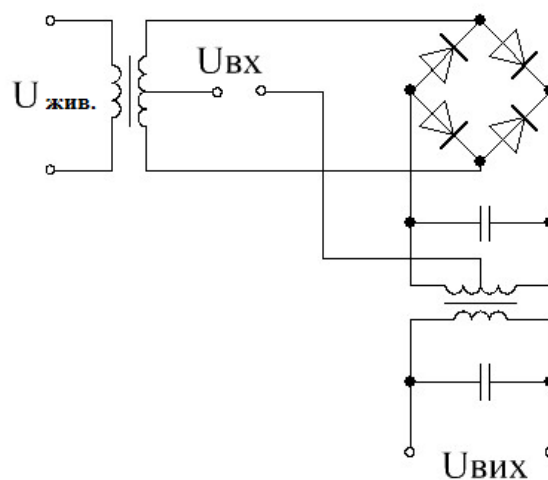


Рисунок 7.6 – Схема кільцевого діодного модулятора

У слідкуючих системах застосовуються також модулятори на напівпровідникових транзисторах, які можуть використовуватися як в підсилювальному режимі, так і в режимі перемикування. У першому випадку модулятори мають значний дрейф нуля і невеликий вхідний опір, що обмежує їх застосування. У другому випадку схеми модуляторів мають велику лінійністю і температурну стабільність. На рисунках 7.7, а і 7.7, б наведені

схеми відповідно одно- і двонапівперіодних транзисторних модуляторів такого роду.

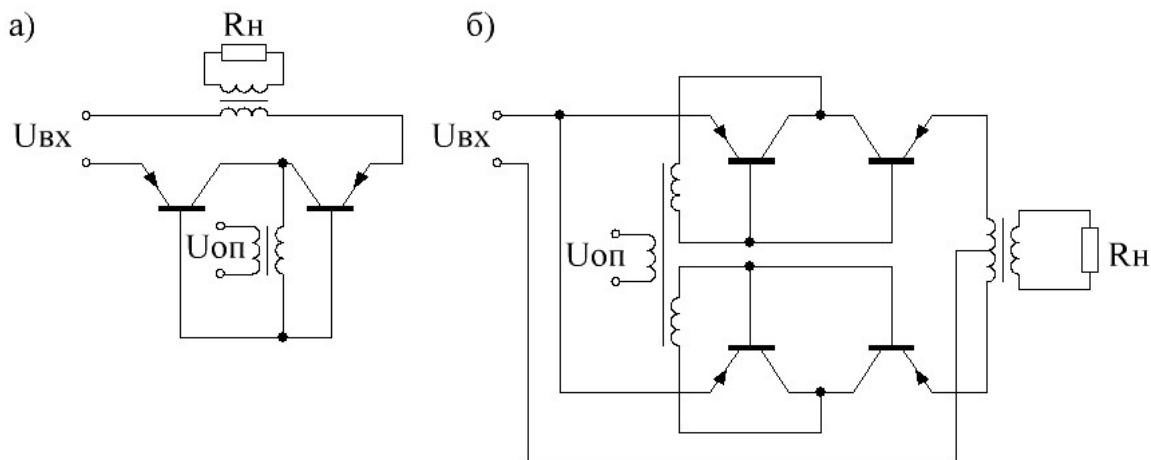


Рисунок. 7.7 – Схеми одно- (а) і двонапівперіодних (б) транзисторних модуляторів

Як транзисторні ключі використовуються в даний час інтегральні переривники, які мають високі точні параметри (малі значення залишкової напруги і струму, незначний дрейф).

У слідкуючих системах застосовують також магнітні модулятори з виходом на основній частоті. Перевагою магнітних модуляторів є можливість підсумувати велику кількість модульованої напруги і виконувати модулятори з великим порогом чутливості і великим коефіцієнтом передачі. Недоліки їх полягають в істотному несинусоїдальності вихідної напруги і в значних габаритах і масі.

## 7.6 Демодулятори

У слідкуючих системах демодулятори служать для фазозалежного випрямлення сигналу. Демодулятори застосовуються для здійснення стабілізації системи за допомогою коригувальних ланцюгів постійного струму,

для розвантаження підсилювального тракту від дії квадратурної складової несучої частоти, для зменшення похибок системи від дії цієї складової.

Основними параметрами демодуляторів є:

- значення коефіцієнта передачі і залежність його від амплітуди сигналу;
- містяться вищі гармоніки на виході демодуляторів;
- дрейф нуля;
- вхідний і вихідний опори;
- інерційність і т. д.

Під коефіцієнтом передачі демодулятора розуміють відношення постійної складової його вихідної напруги до діючого значення сигналу несучої частоти на вході.

Застосовувані в слідкуючих системах демодулятори діляться на фазочутливі випрямлячі і фазочутливі підсилювачі, а в залежності від схем виконання можуть бути поділені на діодні і транзисторні, на одно-, і двопівперіодні. Фазочутливі випрямлячі служать для демодуляції без посилення сигналу за потужністю, а фазочутливі підсилювачі – з посиленням сигналу.

Схема найпростішого випрямного однонапівперіодного демодулятора приведена на рисунку 7.8а. Якщо вхідний сигнал дорівнює нулю, то струм по навантаженню протікає лише протягом одного напівперіоду опорної напруги, причому падіння напруги на навантажувальних резисторах  $R_{н1}$  і  $R_{н2}$  рівні за значенням і протилежні за знаком, внаслідок чого вихідна напруга демодулятора дорівнює нулю.



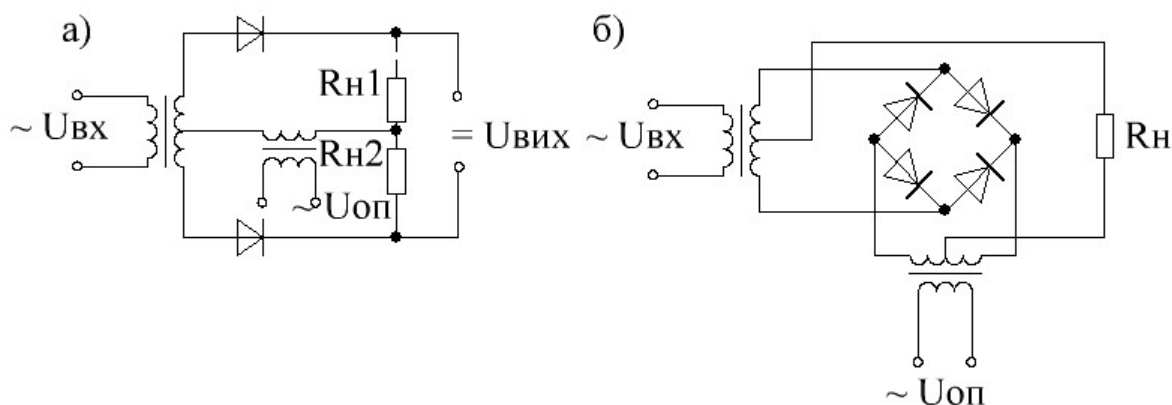


Рисунок 7.8 – Схема випрямного однонапівперіодного демодулятора (а) і схема діодного кільцевого демодулятора (б)

Якщо вхідний сигнал не дорівнює нулю і знаходиться у фазі з опорною напругою, то падіння напруги на опорі  $R_{н1}$  перевершує за значенням падіння напруги на опорі  $R_{н2}$ . При зміні фази сигналу на  $180^\circ$  полярність вихідної напруги демодулятора також змінюється на протилежну.

В якості двохнапівперіодних випрямних демодуляторів використовуються зазвичай діодна кільцева і мостова схеми демодуляторів. На рисунку 7.8б представлена перша з цих схем.

Широке поширення у випрямних демодуляторах отримали також напівпровідникові транзистори, які працюють в режимі перемикачів. Такі схеми забезпечують високу лінійність характеристики навіть при дуже малих напругах сигналу. На рисунку 7.9, а наведена схема двонапівперіодного випрямного демодулятора, який забезпечує високу лінійність характеристики перетворення, стабільність нуля і коефіцієнт передачі при активному навантаженні, дорівнюючий 0,6–0,7.

На рисунку 7.9, б приведена схема двонапівперіодного демодулятора, виконаного на мікросхемах – операційному підсилювачі та інтегральному переривнику.

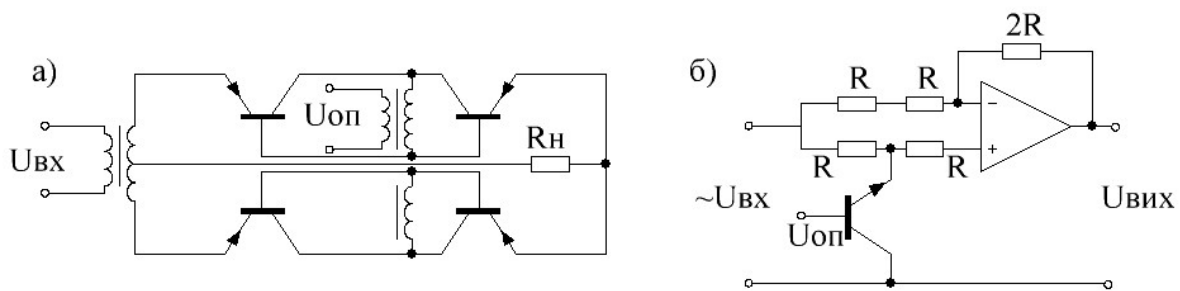


Рисунок 7. 9 – Схеми двонапівперіодного випрямного демодулятора:

а – аналогова; б – на мікросхемах

### Контрольні питання

1. Опишіть напівпровідникові підсилювачі.
2. Наведіть схему вихідного каскаду з трансформаторним зв'язком.
3. Наведіть схему підсилювача змінного струму, працюючий на двофазний двигун.
4. Наведіть схема структурної мініатюризації підсилювачів змінного струму.
5. Які підсилювачі постійного струму ви знаєте?.
6. Наведіть схему ППС з модуляцією вхідного сигналу.
7. Дайте характеристику тиристорних перетворювачів.
8. Поясніть призначення модуляторів.
9. Перелічить умовні позначення однонапівперіодної схеми модулятора на напівпровідникових діодах.
10. Перелічить компоненти схеми кільцевого діодного модулятора.
11. Поясніть схеми одно- та двонапівперіодних транзисторних модуляторів.
12. Визначте поняття «демодулятор».
13. Перелічить компоненти схеми випрямного однонапівперіодного демодулятора.
14. Наведіть схему двонапівперіодного випрямного демодулятора.

## 8 СТРУКТУРНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ РЕЛЕЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

### 8.1 Дискретний електропривод з електродвигуном постійного струму

За видами представленої і оброблюваної інформації дискретні електроприводи (далі – ДЕП) бувають цифрові і імпульсні, а за принципом керування – розімкнуті, замкнуті і комбіновані. ДЕП з електродвигунами постійного струму (ЕДПС) будуються тільки за замкнутою схемою, з головним зворотним зв'язком за швидкістю (приводи регульованої швидкості) і за положенням вихідної ланки (приводного положення), а також з внутрішніми контурами зворотного зв'язку.

За способом зв'язку з ЕОМ дискретні електроприводи поділяються на автономні і неавтономні. Одні й другі можуть мати пропорційне і релейне керування.

На рисунку 8.1. приведена функціональна схема автономного ДЕП. В автономному ДЕП по заданій командній інформації, відкоригованої у віднімальному пристрої ВП сигналом зворотного зв'язку, знімаючи з датчика Д, пристрій посилення-перетворення ППП керує швидкістю і (або) становищем вихідної ланки виконавчого механізму ВМ за допомогою двигуна М.

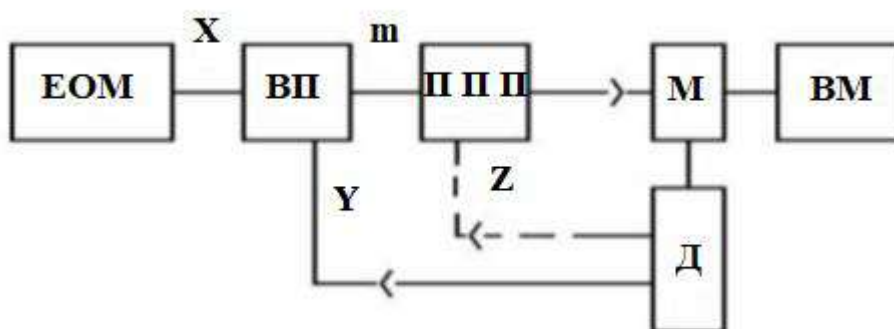


Рисунок 8.1 – Функціональна схема автономного ДЕП

У неавтономному ДЕП порівняння  $X$  (код, який задається) і  $Y$  (код, який відпрацьовується) відбувається в ЕОМ.

Перевагою автономних ДЕП полягає в більш високій частоті порівняння кодів  $X$  і  $Y$  в них, що забезпечує більш високу точність приводу за менш жорстких вимог до вузлів.

В даний час застосовується переважно релейний (імпульсний) принцип керування виконавчим ЕДПС, заснований на амплітудно-імпульсній (АІМ), або на частотно-імпульсній (ЧІМ), або на фазо-імпульсній (ФІМ), або на часово-імпульсній (ЧаІМ), або на широтно-імпульсній (ШІМ) модуляції сигналу. При цьому на ЕДПС подається послідовність одно- або двополярних імпульсів керування з амплітудою, яка дорівнює номінальній напрузі живлення двигуна і тривалістю, пропорційною керуючому сигналу. Такий спосіб дозволяє підвищити ККД системи керування .

Механічні характеристики ЕДПС при імпульсному способі регулювання істотно залежать від характеру протікання струму в ланцюзі ротора. Забезпечення незмінної жорсткості механічної характеристики досягається тільки за умови безперервності струму в ланцюзі ротора. При цьому імпульсне керування ЕДПС еквівалентне безупинному управлінню від генератора із змінною ЕРС:

$$U = Y \cdot U_{\text{жив}}, \quad (8.1)$$

де  $Y$  – скважність імпульсів, які живлять ланцюг ротора ЕДПС;

$U_{\text{жив}}$  – напруга джерела живлення.

Характер струму ротора при імпульсному способі у ланцюзі ротора визначається схемою вихідного каскаду ППП і частотою проходження імпульсів.

Для забезпечення безперервності струму ротора і отримання мінімальних додаткових втрат потужності слід застосовувати мостові схеми вихідного каскаду ППП, які забезпечують режим динамічного гальмування двигуна у проміжках між імпульсами.

Частота комутації може бути постійною тільки при використанні ШІМ, при якій керування двигуном здійснюється за рахунок зміни скважності імпульсів при постійній частоті їх проходження.

Застосування ШІМ дозволяє також забезпечити заданий динамічний діапазон регулювання швидкості, реверс ЕДПС, режим динамічного гальмування. При цьому використовується властивість ЕДПС змінювати напрямок обертання при зміні полярності середнього значення струму в ланцюзі ротора, а також властивість оборотності ЕДПС у генератор постійного струму, коли його ротор обертається по інерції, тобто, обертаючий по інерції ЕДПС замкнути на низькоомне навантаження, відбувається його гальмування, і чим вище струм у цьому навантаженні, тим інтенсивніше гальмування.

Функціональна схема ППП з ШІП приведена на рисунку 8.2.

Тут ШІП – широтно-імпульсний перетворювач напруги у скважність імпульсів  $U$ . ГТІ – генератор тактових імпульсів, СК – схема керування силовими ключами СК1 – СК4 вихідного мостового каскаду, який містить ЕДПС.

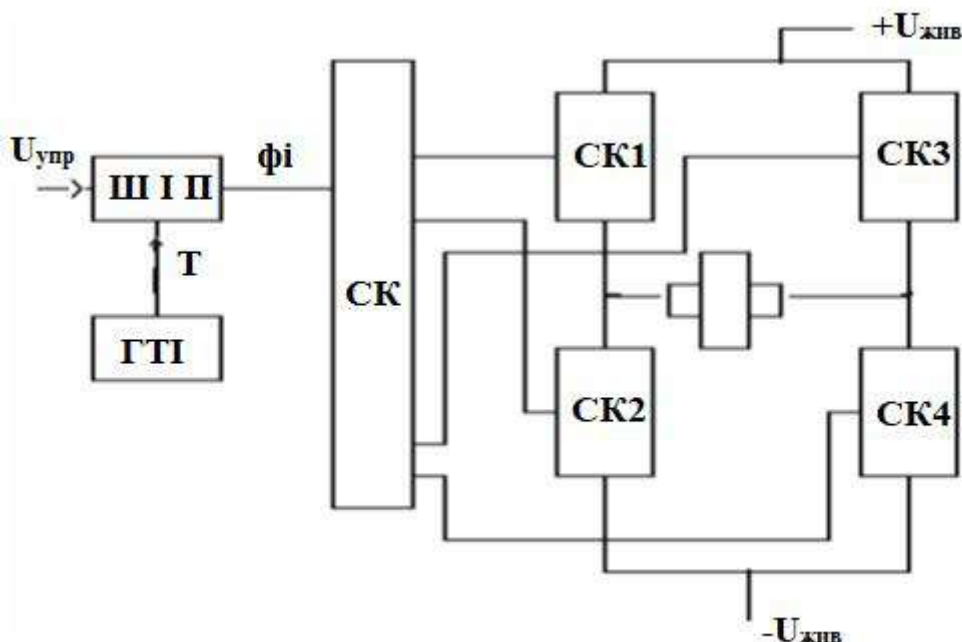


Рисунок 8.2 – Функціональна схема ППП з ШІП

Найбільш простим способом керування ШПП по ланцюгу ротора є симетричний, при якому напруга на виході ШПП представляє собою знакозмінні імпульси, тривалість яких регулюється вхідним сигналом  $U_{упр}$ . У ШПП з симетричним керуванням при

$$Y = \frac{t_u}{T} = 0,5, \quad (8.2)$$

де  $t_u$  – тривалість імпульсу;

$T$  – період проходження імпульсів, середня напруга на роторі і середній струм через нього дорівнюють нулю.

Часові діаграми такого ШПП наведені на рисунках 8.3, а і 8.3, б. З них видно, що в один півперіод відкриті ключі СК1, СК4, а в інший – СК2, СК3.

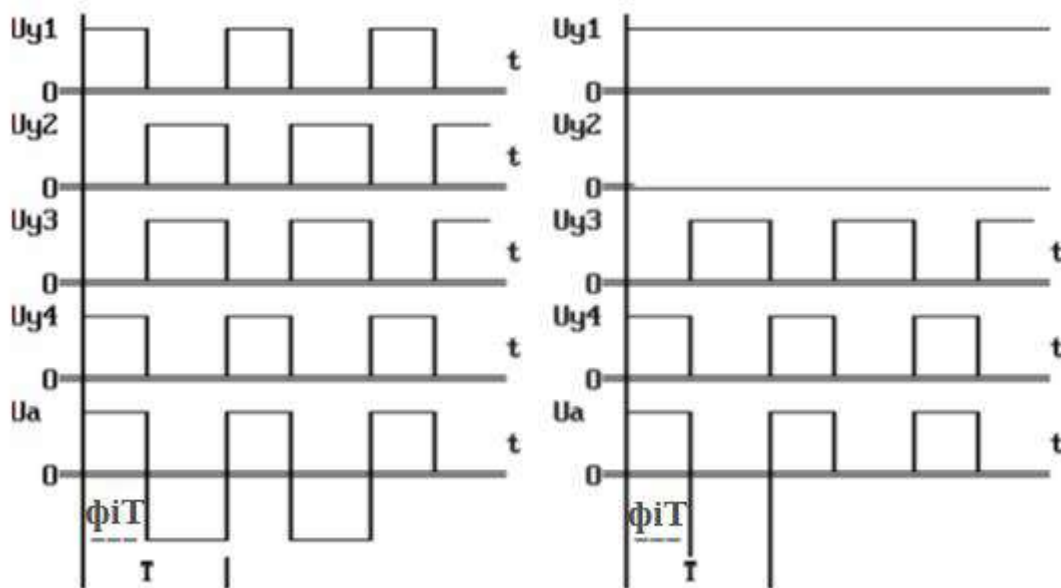


Рисунок 8.3 – Часові діаграми роботи ШПП

Симетричний спосіб керування зазвичай використовують в малопотужних приводах постійного струму. Його перевага – простота реалізації і відсутність зони нечутливості в регульовальній характеристики. Недолік – знакозмінна напруга на ЕДПС і підвищення пульсації струму в його роторі. Несиметричне керування ЕДПС, часові діаграми якого наведені на рис.

8.3б, в деякій мірі знижують недоліки симетричного способу. Тут при одному напрямку обертання ЕДПС управляються ключі СК1, СК2. На час  $\phi T$  розмикається ключ СК1 і замикається ключ СК2, а в інтервалі  $(T-\phi T)$  замикається ключ СК1 і розмикається СК2.

При цьому ключ СК4 постійно розімкнутий, а СК3 – замкнутий. В інтервалі  $(T-\phi T)$  забезпечується протікання струму ротора від ЕРС ЕДПС (в цей час він працює як генератор) через відкриті ключі СК1, СК3, що сприяє уповільненню двигуна. При іншому напрямку обертання ЕДПС здійснюється керування ключами СК3, СК4. Ключ СК1 постійно замкнутий, СК2 – розімкнутий, полярність імпульсів струму через ротор ЕДПС змінюється.

Недоліком несиметричного способу є наявність зони нечутливості при  $\phi = 0$ , коли напруга на вході двигуна:

$$U_d = \phi i \cdot U_{жив} = 0. \quad (8.3)$$

При проектуванні таких електроприводів слід враховувати особливості ЕДПС як навантаження у мостовій схемі. ЕДПС в даному випадку може бути представлений у вигляді еквівалентного послідовного з'єднання активного опору ланцюга ротора  $R_p$ , індуктивності  $L_p$  ротора і ЕРС самоіндукції  $e_p$ .

Індуктивність  $L_p$  обумовлює безперервний характер зміни струму ротора (індуктивність – інтегруюча ланка), але ЕРС самоіндукції, яке виникає у моменти перемикання, істотно впливає на характер процесів у транзисторних силових ключах і повинна бути врахована при розробці їх схем.

Наявність проти-ЕРС також позначається на характері роботи силових ключів. При розгоні ЕДПС в початковий момент часу проти-ЕРС  $e_p = 0$ , і в ланцюзі ротора протікає пусковий струм.  $I_{п} = U_{пр} / R_p$ , який потім зменшується до номінального значення за рахунок появи протиЕДС  $e_p < 0$ . Пускові режими ЕДПС характерні для роботи електроприводів, і розрахунок силових ключів повинен проводитися з урахуванням пускових струмів як робочих.

При різкому реверсі двигуна, який обертається з максимальною частотою, проти-ЕРС  $e_p$ , значення якої досягає напруги живлення, підсумовується з

напругою джерела живлення, в результаті чого струм у ланцюзі ротора і силових ключів зростає до подвоєного значення  $I_{пр}$  і потім зменшується до номінального значення. Таке збільшення струму може виявитися неприйнятним з різних причин, і тому в схему зазвичай вводяться струмообмежувальні елементи, які спрацьовують при досягненні струму ротора граничних значень. Як датчики зворотного зв'язку в автономних ДЕП регульованою швидкості з ЕДПС часто використовуються тахогенератори постійного струму, які представляють собою машину-генератор, ЕРС якої пропорційна швидкості обертання її якоря. У зв'язку з цим до тахогенератора пред'являють ряд вимог: лінійність характеристики, велика крутизна характеристики, мінімальні пульсації вихідної напруги, малий момент інерції ротора, малі габарити і маса. Їх зазвичай виконують як малопотужні генератори з незалежним збудженням або з магнітоелектричним збудженням від постійних магнітів.

Такий привід можна виконати як автономний ДЕП регульованої швидкості з тахогенератором постійного струму в колі зворотного зв'язку. У зв'язку з тим, що такий датчик зворотного зв'язку видає аналогову величину – напругу постійного струму, що пропорційна швидкості обертання, структурна схема (рис. 8.1) може бути модифікована – між виходом ЕОМ і входом ВП встановлюють ЦАП, а віднімальний пристрій ВП виділяє різницю аналогової напруги, яка керує ШПП, до виходу якого підключена схема керування СК, яка керує двигуном через мостову схему, побудовану на силових ключах СК1 – СК4. Функціональна схема такого приводу наведена на рисунку 8.4.



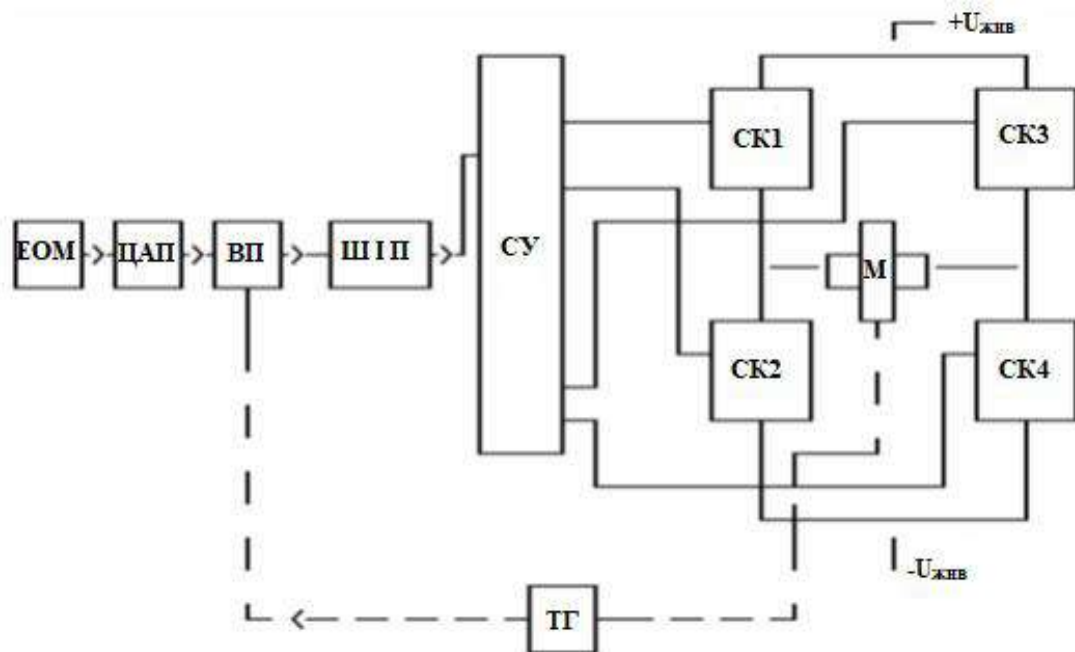


Рисунок 8.4 – Функціональна схема автономного ДЕП з тахогенератором постійного струму в колі зворотного зв'язку

Розглянемо особливості побудови і функціонування ШПІ.

ШПІ зазвичай має два входи, на один з яких надходить керуючий аналоговий сигнал – різниця  $X - Y$ , а на інший – періодичний пилкоподібний сигнал з ГТІ. На зміну знаку вхідного сигналу ШПІ реагує або зміною полярності імпульсної послідовності, або наявністю імпульсної послідовності на одному з двох виходів.

При несиметричному імпульсному способі керування використовується ШПІ з двома виходами (рис. 8.5). Тут  $U_{упр}$  – вхідна управляюча напруга,  $U_{пil}$  – симетричний пилкоподібний сигнал з періодом  $T_i$  амплітудою  $U_{пil}$  – надходять на входи підсумовуючого пристрою Е. Вихідний сигнал суматора  $U_e$  подається на вхід двох компараторів К1 і К2, рівні спрацьовування яких  $U_{оп1} > 0$  і  $U_{оп2} < 0$ . Значення напруги спрацьовування компараторів  $U_{оп1}$  і  $U_{оп2}$  встановлюються відповідно до діаграми вихідної напруги  $U_e$  при  $U_{упр} = a$ , тобто  $|U_{оп1}| = |U_{оп2}| = U_{пil}$ . В цьому випадку при  $U_{упр} = 0$  стан компараторів К1 і К2 не змінюється протягом усього періоду  $T$  пилкоподібної напруги, і на виходах ШПІ – нульова напруга. При  $U_{упр} \neq 0$  симетрія напруги  $U_e$  щодо осі  $t$

порушується, що призводить до спрацьовування одного з компараторів. При  $U_{упр} > 0$  імпульси  $t_{и}$  видає К1, а при  $U_{упр} < 0$  – К2. Ширина імпульсів  $t_{и}$  пропорційна напрузі  $U_{упр}$ , а швидкість обертання двигуна пропорційна  $t_{и}$ .

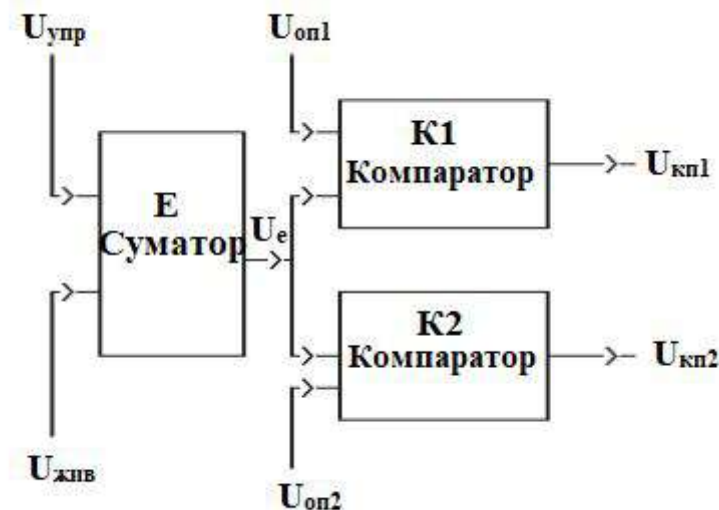


Рисунок 8.5 – ШП з двома виходами

## 8.2 Електромехатронний перетворювач з електродвигунами.

### Базові структури

Традиційні побудови ЦСП базуються на використанні безперервних замкнутих ЕМТП, які набули широкого поширення у техніці перетворення цифрової інформації у переміщення. Питанням проектування і особливостям роботи пристроїв цього класу приділено значну увагу, менше відображення в літературі отримали питання проектування ЕМТП з КЕД, які дозволяють вирішувати аналогічні завдання більш ефективно.

Тому певний інтерес представляють особливості їх застосування в ЦСП для перетворення цифрової та аналогової інформації у переміщення.

Залежно від способу завдання і перетворення вхідної інформації ЦСП з КЕД поділяються на розімкнуті і замкнуті.

Перші передбачають безпосереднє перетворення цифрових кодів ЕОМ у переміщення без застосування контурів головною зворотного зв'язку, тобто є

ЦСП прямого перетворення. Другі передбачають застосування контуру зворотного зв'язку по перетворювальному параметру, причому цей контур може бути аналоговим, імпульсним або цифровим. При цьому слід враховувати, що ЕМТП з КЕД може бути розімкненим або замкнутим, тобто може мати місцеві локальні зворотні зв'язки.

Використання цифрових ЕОМ при управлінні складними процесами, наприклад рухом ланок ПР, дозволяє контролювати поведінку системи одночасно по великій кількості параметрів. Кодові сигнали, які виробляються на основі всієї отриманої інформації, безпосередньо перетворюються КЕД у переміщення виконавчого органу, який дозволяє підвищити надійність і швидкодію комплексу в цілому при істотному зниженні вартості органів керування та спрощення структурної схеми. Остання обставина у ряді випадків має вирішальне значення, так як синтез багатоеlementних САУ з розвиненими ланцюгами зворотного зв'язку і аналізом їх перешкодозахищеності, і стійкості пов'язані з великим обсягом робіт.

Синтез розімкнутої САУ зводиться до вибору стандартних елементів цієї системи електронного комутатора КЕД та ПМ на основі критеріїв стійкості, швидкодії і точності. Методи синтезу розімкнених САУ з КЕД досить повно розроблені і доведені до рівня інженерної практики.

Розімкнутий ЕМТП з КЕД сприймає імпульсну інформацію, яка характеризується частотою проходження і числом імпульсів. Такий ЕМТП відноситься до розряду слідкуючих і забезпечує можливість глибокого частотного регулювання швидкості. Він дозволяє здійснити числове завдання шляху і забезпечує надійну фіксацію кінцевих координат руху.

Структура ЦСП прямого перетворення з розімкненим ЕМТП на основі КЕД приведена на рисунку 8.6.

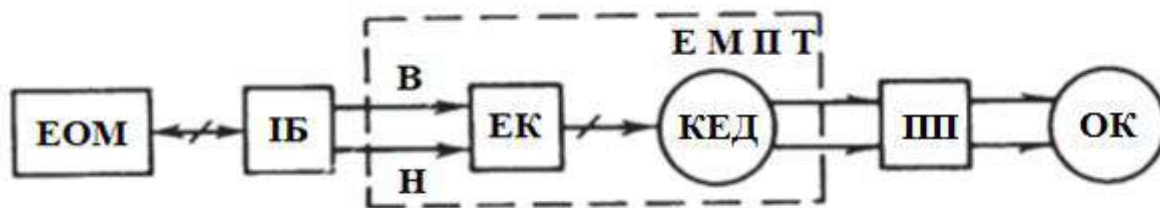


Рисунок 8.6 – Структура ЦСП прямого перетворення з розімкненим ЕМТП на основі КЕД

Електромеханотронний перетворювач містить ЕК і КЕД. На входи ЕК надходять імпульси керування. Залежно від конкретного застосування можливі варіанти двоканального керування від ЕОМ через інтерфейсний блок ІБ, коли імпульси кожного напрямку подаються на окремі входи ЕК вперед В, назад Н і одноканального керування, коли напрямок відпрацювання визначається полярністю вхідних імпульсів. У ряді випадків використовується імпульсно-потенційне керування, коли на один вхід ЕК подається імпульсна послідовність, яка визначає переміщення, а на другий – потенційний сигнал, який визначає напрямок. Шаговий електродвигун через ПМ переміщує ОК.

Зазвичай ЕК складається з розподільника імпульсів РІ та підсилювача потужності ПП, причому їх число відповідає числу комутованих обмоток КЕД. Не виключено застосування суміщених варіантів ЕК, коли функції розподілу і посилення необхідної послідовності імпульсів суміщені в одному пристрої – комутаторі з поєднаною логікою. У зв'язку з використанням мікропроцесорного керування широкого поширення набули варіанти побудови, в яких функції РІ виконуються мікропроцесорами МП.

Порівняльна оцінка ЦСП з безперервними і шаговими електродвигунами дозволяє виділити наступні переваги останніх:

- 1) структурна простота в зв'язку з відсутністю ПЗЗ;
- 2) велика глибина регулювання швидкості;
- 3) можливість зміни показників за рахунок ЕК;

- 4) мала статична похибка, яка не перевищує шагове переміщення;
- 5) простота настройки і висока надійність.

Перераховані переваги дозволяють прискорити розробку ЦСП, спростити їх аналіз і підвищити експлуатаційні показники в порівнянні з ЕМТП безперервного типу.

Структурна схема ЦСП компенсаційного типу з розімкненим ЕМТП представлена на рисунку 8.7.

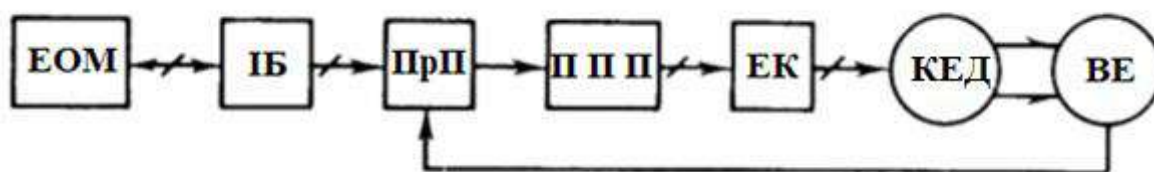


Рисунок 8.7 – Структурна схема ЦСП компенсаційного типу  
з розімкненим ЕМТП

На вхід від ЕОМ надходить безпосередньо або через ЦАП інформація, яка підлягає перетворенню у переміщення. У ПрП вона порівнюється з поточним значенням переміщення, що надходять по ланцюгу головного зворотного зв'язку від вимірювального елемента ВЕ. Отримана на виході ПрП неузгодженість надходить на ППП, де посилюється і перетворюється у форму, необхідну для керування розімкненим ЕМТП, який складається з ЕК і КЕД.

Структурна схема ЦСП прямого перетворення з розімкненим ЕМТП призначена для безпосереднього перетворення цифрової інформації від ЕОМ і, на відміну від ЦСП компенсаційного типу, не включає в себе контур зворотного зв'язку, який містить ПрП і ВЕ.

Незалежно від структурних особливостей, ЦСП з розімкненим ЕМТП можуть реалізувати релейний і пропорційний режими керування. У тому випадку, коли керуючий вплив на вході ЕМТП представлено у вигляді коду, пропорційне керування здійснюється за рахунок перетворення «код-частота імпульсів». Якщо сигнал неузгодженості на вході ЕМТП представлений у

вигляді аналогової величини, наприклад постійної напруги, то пропорційне керування забезпечується ПНЧ.

Така побудова дозволяє реалізувати підвищення швидкодії ЦСП за рахунок використання режимів програмованого розгону і гальмування розімкнутого ЕМТП шляхом зміни швидкості відпрацювання КЕД. У цих режимах КЕД працює з частотою вхідних сигналів, меншої частоти прийнятності, а в режимі програмного розгону – з частотою, що перевищує частоту прийнятності. У міру зменшення неузгодженості КЕД переходить у режим програмованого гальмування до частоти, яка забезпечує надійне гальмування і фіксацію в момент завершення процесу перетворення.

Застосування розімкнутого ЕМТП з КЕД характеризується простотою реалізації структури ЦСП. Недоліком такої побудови системи є обмежена швидкодія, яка визначається на практиці частотою реверсу КЕД у сталому або перехідному режимі. Програмований розгін компенсує це обмеження при відпрацюванні великих неузгодженостей.

Іншим шляхом, що дозволяє підвищити добротність розімкнутого ЕМТП з КЕД, є зміна ціни шагу в процесі відпрацювання, тобто його дроблення. Зменшення дискретності при штучному дробленні шагу дозволяє домогтися збільшення швидкості відпрацювання системи при використанні КЕД більшої потужності з тими ж швидкісними характеристиками, що дозволяє зменшити механічну редукцію ПМ між ОК та КЕД, а в ряді випадків виконати безредукторну систему. Крім зниження трудомісткості виготовлення ІСМ, це призводить до різкого підвищення надійності ЦСП.

### **8.3 Електромехатронний перетворювач на основі вентильних електродвигунів**

Основні обмеження, що виникають при роботі розімкнутого ЕМТП з КЕД, пов'язані з відсутністю зворотного зв'язку між введеною у нього енергією і рухом ротора. Ця особливість найчастіше служить причиною коливального

характеру відпрацювання управляючих впливів, викликає втрату стійкості у перехідних режимах. Стійка робота КЕД при реальних вхідних впливах досягається шляхом зниження його швидкодії, що усуває можливість випадання його з синхронізму в процесі розгону і гальмування.

Важливим чинником, що обмежує швидкодію ЦСП з КЕД, є його чутливість до варіацій моменту інерції. Застосування програмованих режимів розгону і гальмування з метою підвищення сумарного швидкодії системи виявляється недостатньо ефективним, оскільки в програмі можна врахувати випадкові відхилення параметрів.

Прагнення до підвищення точності ЕМТП з КЕД призвело до розробки мінішагового керування, заснованого на дробленні шагового переміщення. Електричне дроблення шагу дозволяє підвищити точність позиціонування системи, при цьому її швидкодія змінюється незначно. Спільне рішення задачі підвищення швидкодії і точності ЦСП досягається в локально-замкнутому ЕМТП.

Кількісні зміни показників КЕД, охопленого контуром МЗЗ за положенням ротора і працюючого в режимі самокомутації, призводять до якісних змін електромеханічного перетворювача енергії, яка трансформується в ВЕД з дискретної комутацією.

Безперервна комутація ВЕД може розглядатися як граничний випадок дискретної комутації з нескінченним коефіцієнтом дроблення шагу.

У зв'язку з тим, що спочатку завданням, поставленим при створенні ВЕД, була заміна колекторного вузла двигунів постійного струму електронним комутатором ЕК і створення машин з близькими механічними і регульовальними характеристиками, на відміну від прототипу, їх стали називати безконтактними двигунами постійного струму (далі – БДПС). За кордоном подібні електричні машини називають безщітковими двигунами постійного струму. У посібнику використовується термін «вентильний електродвигун» ВЕД, який найбільш повно відображає фізичні процеси в цьому електромеханічному перетворювачі енергії.

Дискретний ЕМТП з ВЕД працює в режимі самокомутації обмоток керування. На відміну від пошагового керування, використовуваного з КЕД, де режими розгону і гальмування реалізуються програмним керуванням, які передбачають параметричне завдання зміни швидкості руху, самокомутація базується на використанні автоматичної зміни швидкості руху на основі інформації про переміщення, яка надходить по контуру МЗЗ. Такий спосіб керування надає двигуну властивість адаптації до зміни параметрів комплексу «ВЕД-навантаження».

Використання принципів адаптивного керування можливо і при покроковому керуванні, коли проводиться оптимізація моменту, який розвивається двигуном, на основі аналізу характерних особливостей кривої струму в обмотках КЕД. Однак при такій оптимізації показників ЕМТП з КЕД поступається ЕМТП з адаптивним регулятором ВЕД, охопленого МЗЗ.

У дискретному ЕМТП командний сигнал, який здійснює чергову комутацію обмоток ВЕД, формується в РІ надходять по каналу МЗЗ імпульсом з датчика положення ротора ДПР. Поява цього імпульсу свідчить про те, що попередня команда виконана і дискретне переміщення ротора сталося.

Основною перевагою ВЕД у порівнянні з КЕД є те, що стійкість і якість руху ЕМТП з ВЕД в основному залежать від його структури і тому піддаються цілеспрямованому впливу, в той час як в розімкнутому ЕМТП ці визначальні показники цілком залежать від параметрів КЕД та об'єкта керування, які піддаються зміні лише в обмежених межах.

Завдяки гнучкості ВЕД вдається або розширити діапазон робочих швидкостей при позиціонуванні і стеження з заданою точністю, або підвищити точність позиціонування і стеження при заданих швидкостях, або отримати граничні показники по швидкості і точності.

Структурна схема дискретного ЕМТП з ВЕД будується на основі структурної схеми розімкнутого ЕМТП з додаванням ДПР і комутуючого пристрою КП, призначеного для сполучення ДПР з ЕК (рис. 8.8).



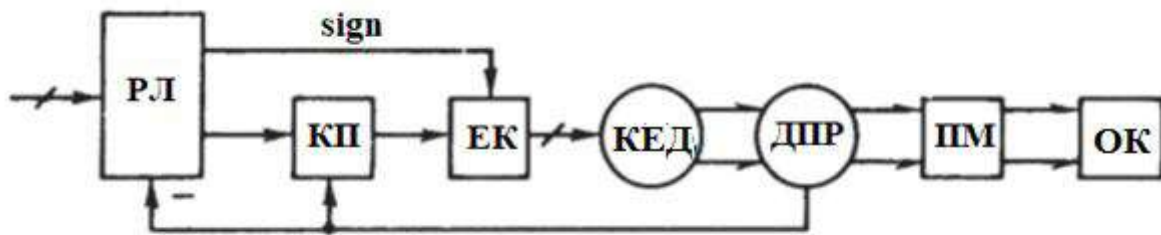


Рисунок 8.8 – Структурна схема дискретного ЕМТП з ВЕД

Цифрова інформація, яка підлягає перетворенню у переміщення, вводиться у вигляді паралельного коду в РЛ. За наявності у ньому інформації, КП підключає вихід ДПР до входу ЕК, напрямок роботи якого визначається сигналом *sign* з виходу РЛ. Вентильний електродвигун починає обертатися під *sign* дією імпульсів, які надходять з ДПР. Швидкість руху залежить від співвідношення моменту, який розвивається двигуном, і параметрів навантаження, тобто ПМ і ОК.

Шляхом введення випередження або відставання керуючих імпульсів, які надходять від ДПР на ЕК, можна змінювати кут комутації, який забезпечує регулювання частоти обертання у процесі розгону і гальмування. Це дозволяє підвищити показники ЕМТП у порівнянні з показниками ЕМТП з ВЕД, які працюють при незмінному куті комутації.

Введення широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) фазної напруги дискретного електродвигуна в функції неузгодженості системи, дозволяє в поєднанні з самокомутацією побудувати ЕМТП з подвійним керуванням, який забезпечує поліпшення енергетичних показників ЕМТП.

Електромеханотронні перетворювачі, які використовуються в ЦСП, в залежності від закону регулювання, можна розділити на пропорційні, релейні і оптимальні за швидкодією. Як уже зазначалося, ЦСП з розімкненим ЕМТП можуть бути виконані релейними і пропорційними.

Перевагою дискретного ЕМТП є те, що, застосовуючи його, можна реалізувати оптимальне керування процесом перетворення цифрової інформації

у переміщення. Для реалізації оптимальної за швидкодією системи, потрібно більш високий рівень інформаційного забезпечення у порівнянні з рівнем інформаційного забезпечення пропорційної або релейної системи. Для формування оптимального алгоритму керування в ній необхідно мати інформацію не тільки про положення, а й про швидкість руху ротора електродвигуна. Така інформація може бути отримана або від окремого датчика швидкості ротора ДШР, або від ДПР у результаті додаткового перетворення його вихідних сигналів шляхом їх диференціювання. У зв'язку з тим, що сучасні ДШР, як правило, виконуються на основі імпульсних тахометрів, імпульсний метод формування сигналу зворотного зв'язку набув найбільшого поширення.

Залежно від типу застосовуваного ДПР розрізняють варіанти побудови ВЕД з імпульсним, потенційним і кодовим формуванням сигналів МЗЗ, яким відповідає зростаючий рівень структурної завадостійкості.

### **Контрольні питання**

1. Дайте характеристику дискретному електроприводу з електродвигуном постійного струму.
2. Наведіть функціональну схему автономного ДЕП.
3. Перелічить компоненти функціональної схеми ППП з ШПП.
4. Наведіть функціональну схему автономного ДЕП з тахогенератором постійного струму в колі зворотного зв'язку.
5. Наведіть блок-схему ШПП з двома виходами.
6. Наведіть базові структури електромехатронного перетворювача з електродвигунами.
7. Наведіть блок-схему структури ЦСП прямого перетворення з розімкненим ЕМТП на основі КЕД.
8. Наведіть блок-схему структури ЦСП компенсаційного типу з розімкненим ЕМТП.

9. Дайте характеристику електромехатронного перетворювача на основі вентильних електродвигунів.
2. Перелічить компоненти структурної схеми дискретного ЕМТП з ВЕД.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Блинков Ю. В. Электромеханические системы : учеб. пособие / Ю. В. Блинков. – Пенза : Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2001. – 204 с.
2. Домрачев Ю. С. Цифро-аналоговые системы позиционирования / Ю. С. Домрачев, Ю. С. Смирнов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 135 с.
3. Волков Н. И. Электромашинные устройства автоматики: учеб. пособие для ВУЗов / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров. – Москва : Высшая школа, 1986. – 335 с.
4. Ахметжанов А. А. Следящие системы и регуляторы: учеб. пособие для ВУЗов / А. А. Ахметжанов, А. В. Кочемасов. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 288 с.
5. Сабинин Ю. А. Электромашинные устройства автоматики : учеб. для ВУЗов / Ю. А. Сабинин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 408 с.
6. Андре П. Конструирование роботов: учеб. пособие / П. Андре, Ж-М. Кофман, Ф. Лот, Ж-П. Тайар; пер. с англ. Д. М. Далечиной, М. С. Фанченко, В. И. Чебуркова ; под ред. А. М. Долгова. – Москва : Мир, 1986. – 360 с.
7. Блинков Ю. В. Проектирование электроприводов роботов : учеб. пособие / Ю. В. Блинков, В. А. Клевалин, В. В. Марченко. – Пенза : ППИ, 1990. – 200 с.

*Навчальне видання*

**ЄСАУЛОВ** Сергій Михайлович,  
**БАБІЧЕВА** Ольга Федорівна,  
**ВОРОНОВ** Роман Володимирович

## **СУЧАСНІ АВТОМАТИЗОВАНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ І СИСТЕМ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів 3–4 курсів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка, освітньої програми «Електромеханічні системи  
автоматизації та електропривод» і 2 курсу всіх форм навчання освітнього  
рівня «магістр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка, спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації  
та електропривод»)*

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*  
За авторською редакцією  
Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2020, поз. 70Л.

---

Підп. до друку 13.07.2020. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографії. Ум. друк. арк. 8,2.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.