

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Електротехнічний факультет
Кафедра: Електричної інженерії

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Системи керування електроприводами»
для студентів спеціальності G3 Електрична інженерія (за старим переліком
спеціальностей 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)

Розробив: к.т.н., доц. Осадчук Ю.Г.

Кривий Ріг
2025

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Системи керування електроприводами» для здобувачів в галузі знань: G Інженерія, виробництво та ; спеціальність: G3 Електрична інженерія (за старим переліком спеціальностей 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка), КНУ, 2025. - 64 с.

Розробник:

Осадчук Ю.Г. – канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії.

Рецензент:

Сінчук О.М. – завідувач кафедри електричної інженерії, д-р техн. наук, професор.

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри електричної інженерії

Протокол №1 від 28 серпня 2025 року

Завідувач кафедри _____ О.М. Сінчук

Схвалено Вченою радою електротехнічного факультету

Протокол №1 від 30 серпня 2025 року.

Голова _____ В.О. Федотов

Схвалено групою забезпечення ОПП

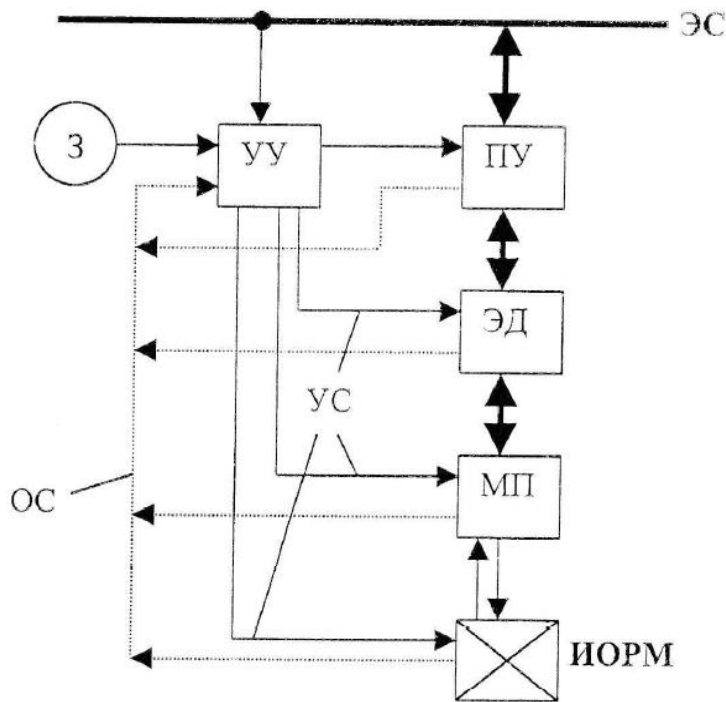
Протокол № 1 від 26 серпня 2025 року

Гарант ОПП _____ Пересунько І.І.

(підпис)

РОЗІМКНУТІ СКЕП

Структура АЕП



«ЭС» - енергетична система;
 «З» - задатчик;
 «УУ» - пристрій керування;
 «ПУ» - перетворюючий пристрій;
 «ЭД» - електродвигун;
 «МП» - механічна передача;
 «ИОРМ» - виконавчий орган робочої машини;
 «ОС» - зворотні зв'язки – інформаційні (пунктирні лінії);
 «УС» - керуючі зв'язки (суцільні тонкі лінії);
 Двонаправлені товсті стрілки – силові електричні зв'язки;
 Подвійні двонаправлені стрілки – механічні зв'язки.

Класифікація СКЕП

Дається з позицій системного підходу

I За інтелектом:

1. Адаптивні – які налаштовуються самі;
2. Звичайні – не можуть налаштовуватись самі;

II За родом задачі регулювання:

1. Стабілізація;
2. Відслідковування;
3. Програмне керування

III За структурою:

1. Разомкнуті;
2. Замкнуті;
- а) одно контурні
- б) багатоконтурні:
 - з послідовними (підлеглими) контурами
 - з паралельними контурами
 - з перехресними контурами

IV За принципом наявності

VI За типом ЕД:

1. Змінного струму:
 - синхронні
 - асинхронні
2. Постійного струму:
 - послідовного збудження
 - незалежного збудження
 - змішаного збудження

VII За родом задачі регулювання:

1. Машинні;
2. Магнітні;
3. Іонні;
4. Вентильні і т.д.

VIII За видом передачі:

1. Редукторні;
2. Безредукторні;
3. Електрогідравличні;
4. Електропневматичні.

IX За кількістю двигунів:

помилки керування:

1. Статичні;
2. Астатичні;

1. З одним двигуном;
2. З багатьма двигунами;

V За принципом роботи по часу:

1. Аналогові;
 2. Дискретні;
- релейні
 - імпульсні
 - цифрові

X За властивістю характеристик:

1. Лінійні
 2. Нелінійні
- і т.д.

Функції СКЕП

I Основні функції:

1. Пуск - зупинка - гальмування - реверс.
- 2.. Стабілізація - підтримання регульованої координати на заданому рівні з заданою точністю.
3. Відслідковування - забезпечення ЕП обробки заданої змінної з помилкою, що не перевищує допустиму, якщо завдання змінюється за випадковим законом.
4. Програмне управління - те саме, що і стеження, але завдання змінюється по заздалегідь заданою програмою.
5. Адаптація - забезпечення електроприводу найбільш вигідних режимів функціонування.

II Умовно-додаткові функції

1. Захист - технічний захід, спрямований на запобігання розвитку аварій.
2. Блокування - технічний захід, що запобігає аварію, можливу в результаті неправильних дій оператора або УУ.
3. Сигналізація - отримання інформації про функціонування об'єкта (світловий, звуковий сигнал).

Вимоги до СКЕП

Поділяються на технологічні вимоги, техніко-економічні вимоги, вимоги безпеки і надійності.

Технологічні вимоги.

1. Умови пуску - зупинки - гальмування - реверсу.
2. Діапазон регулювання Д:

$$Д = \frac{X_{max}}{X_{min}},$$

де X_{max} , X_{min} — максимальне і мінімальне значення регульованої координати, відповідно.

3. Точність регулювання або статизм системи розглядається на прикладі координати – швидкості (статизм Δ - це відношення просадки швидкості $\Delta\omega$ при номінальному струмі або моменту до швидкості ідеального холостого ходу ω_0 , що виражене у відсотках і віднесено до діапазону регулювання D).

Розглянемо на прикладі статичних характеристик системи ТП-Д (рис.1)

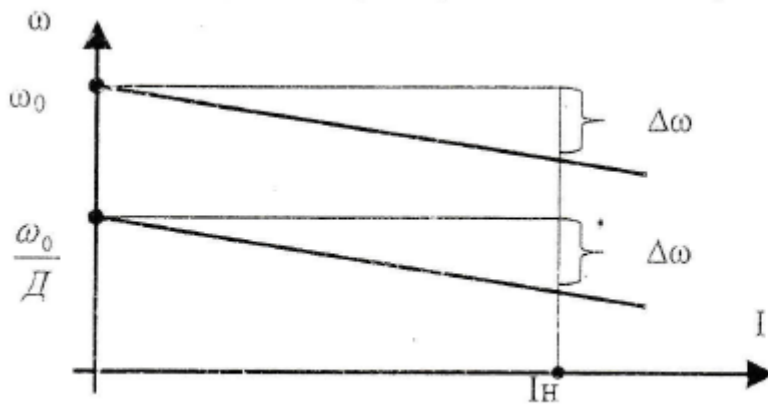


Рис. 1

Для верхньої характеристики діапазона:

$$\Delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cdot 100\%$$

Для нижньої характеристики статизм Δ^* визначається:

$$\Delta^* = \frac{\Delta\omega}{\frac{\omega_0}{D}} \cdot 100\% = \Delta \cdot D$$

Технологічно задане значення статизму визначається тільки по нижній характеристиці (для забезпечення безпечної експлуатації електроприводу). Завжди прагне до зменшення помилки до нуля:

$$\Delta^* \leq \Delta^*_0 \rightarrow 0$$

4. Вимоги динаміки:

- а) динамічна стійкість;
- б) час перехідного процесу (час регулювання t_p).

Час регулювання t_p - це час переходу системи з одного сталого зі стояння в інше. Час закінчення перехідного процесу регламентується: перехідний процес вважається закінченим, якщо регульована координата не виходить за межі 2,5 - 5% від нового сталого значення (задається технологією).

Завжди прагнуть до зменшення часу регулювання:

$$t_p \leq t_\mu \rightarrow 0$$

в) пере регулювання δ - це відношення першого максимального перевищення регульованої координати ΔX_y нового сталого значення X_y до X_y , виражене у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta X_y}{X_y} \cdot 100\%$$

Можуть бути також задані додаткові показники динаміки:

- частота очікуваних коливань Ω ;

- число коливань за час регулювання p ;
 - коефіцієнт затухання перехідного процесу ε .
5. Необхідність обмежування координат.
6. Необхідність адаптації привода.

Техніко-економічні вимоги.

Техніко-економічні вимоги можуть зводитися до мінімізації функціоналу

$$Z = K + \Xi \rightarrow \min,$$

де K – капітальні витрати (вартість будівель та споруд, витрати на монтаж та закупівлю обладнання, вартість капітальних ремонтів та інше); Ξ – експлуатаційні затрати (вартість витрат матеріалів і електроенергії, зарплата, вартість поточних ремонтів та ін.).

Мінімізація функціоналу може бути досягнута:

1. Мінімальними масо-габаритними показниками.
2. Мінімальною кількістю комутаційної апаратури.
3. Однотипного обладнання, блочністю, секційні виконання.
4. Гнучкістю, простотою переходу з одного режиму в інший.
5. Енергетичним відповідністю конструктив електроустановок.

Вимоги надійності.

Надійність H – це ймовірність безпечної роботи p протягом заданого проміжку часу T .

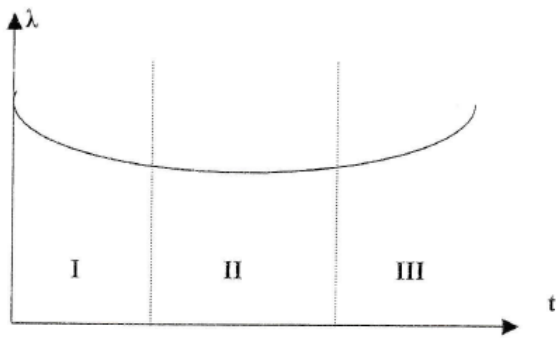
Кількість відмов на одиницю часу λ :

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

де n – кількість груп однотипних елементів у системі ЕП; k – кількість елементів у певній n групі; λ_i – кількість відмов групи, яка містить набір окремих елементів m , з кількістю відмов λ_m :

$$\lambda_i = \sum_{m=1}^k \lambda_m.$$

Якщо скласти приблизний графік кількості відмов обладнання, за період експлуатації t , то в цьому випадку можна виділити три зони:



I – зона підробітки;
 II – зона стійкої роботи;
 III – зона зносу

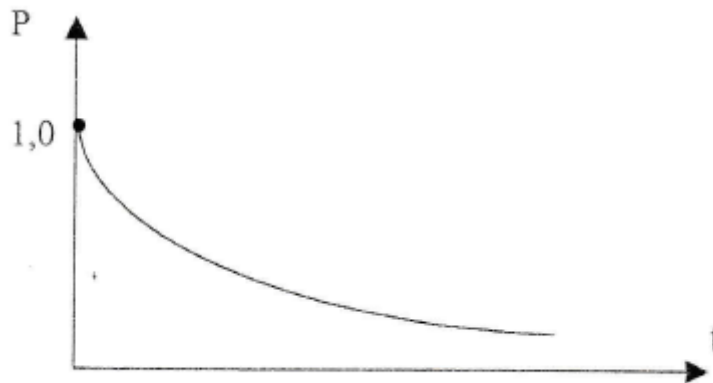
Залежність між T та λ :

$$T = \frac{1}{\lambda}.$$

Залежність між p та t :

$$p = e^{-t/T},$$

або графічно:



Додатковий показник надійності роботи обладнання:

Ремонтопридатність - характеризує витрати часу і коштів на усунення аварії.

Підвищення надійності досягається застосуванням більш високонадійного устаткування; доступністю контрольних точок; простотою схеми виконання; блочністю, секційні обладнання; наявністю справних захистів і блокувань, відсутністю помилкових ланцюгів.

Вимоги безпеки.

Безпека - це ймовірність неураження персоналу електричним і механічним шляхом.

Безпека досягається:

1. Справність заземлення, огорожень, наявністю попереджувальних плакатів;
2. Доступністю контрольних точок;
3. Гальванічною розв'язкою електричних ланцюгів;
4. Перешкодозахищеністю;
5. Додержанням правил ПТЕ, ПТБ і ПУЕ при експлуатації;
6. Наявністю і справністю захисних засобів;
7. Дотриманням ергономічних вимог і інші.

Електричні схеми (ЕС), їх читання

Електричні схеми розділяють:

1. Структурні схеми - дають загальне уявлення про входні елементи, їх розташування і взаємозв'язки. Інша назва структурних: схем - алгоритмічні, блок-схеми.
2. Принципові (ВЕЗ) - це креслення, де детально розглядається взаємозв'язок між елементами з їх електричними зв'язками і сполуками, поза їх просторового розташування.
3. Монтажні схеми - показують розташування елементів в просторі.

Читання ПЕС здійснюється в наступній послідовності:

1. Характеризується стан схеми в знеструмленому стані.
2. Визначається порядок підготовки схеми до нормальної роботи.
3. Робота схеми в нормальних режимах.
4. Робота схеми в аномальних режимах.

СКЕП при живленні двигуна від мережі

Схема, в якій одному впливу відповідає одна подальша реакція, називається однотактною. Схема, в якій одному впливу відповідає кілька послідовних реакцій, називається багатотактною. Особливістю багатотактних схем є на відмінність контакторів, реле з їх контактами, а також типових логічних елементів в логічних схемах управління.

Умовне позначення елементів ЕС

Лінійні контактори або пускачі мають силові контакти і блок-контакти. Сілові контакти обладнуються засобами дугогасіння і позначаються, наприклад: нормально відкритий, нормально розімкнутий або замикає контакт



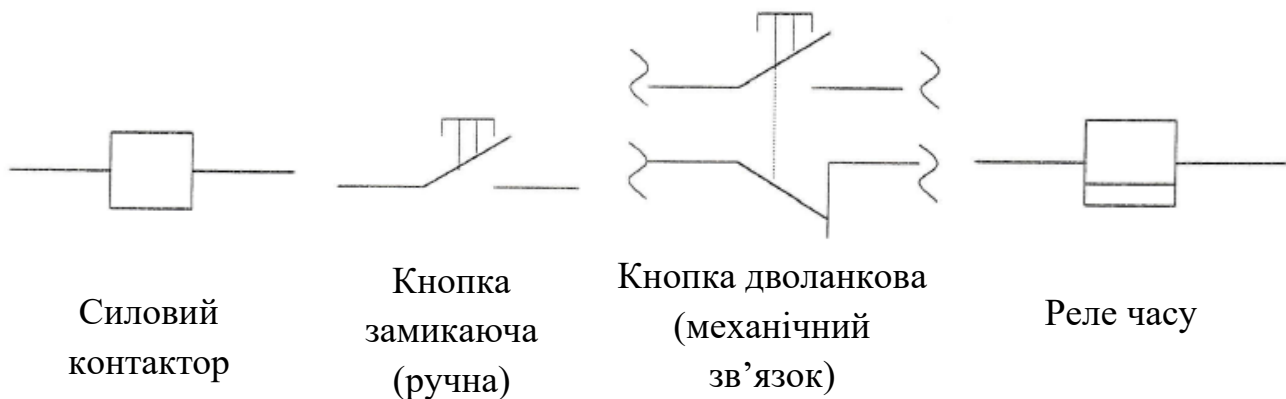
Реле не містить силових контактів, а тільки блок-контакти (призначені для перемикачів в слабкострумівих ланцюгах - ланцюгах управління):



Нормально замкнутий (закритий) або розмикаючий контакт з витримкою у часі на розмикання.



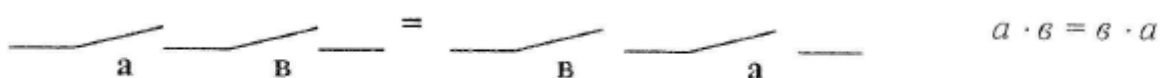
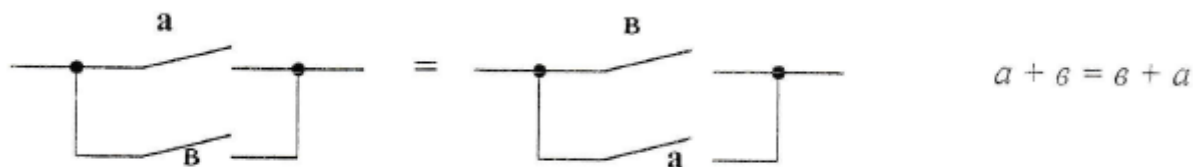
Нормально відкритий (розімкнений) або замикаючий контакт з витримкою у часі на розмикання.



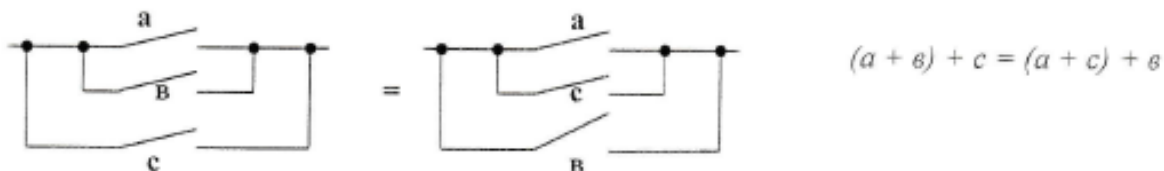
Основні закони алгебри логіки і рівносильності

Логічні елементи (елементи булевої алгебри логіки) мають два стійких зі стояння: «1» - високий рівень, «0» - низький рівень. Основні закони алгебри логіки:

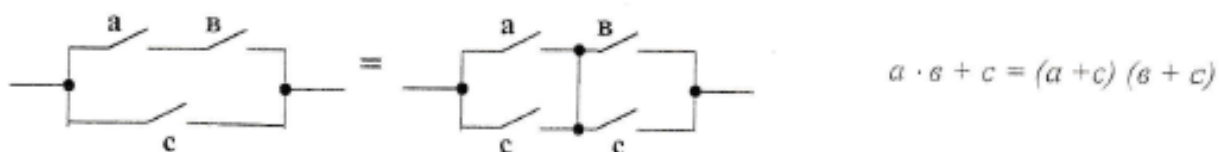
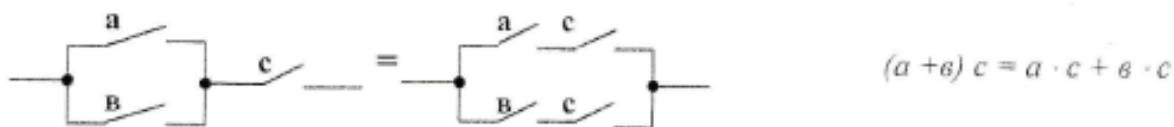
1. Переміщуючий



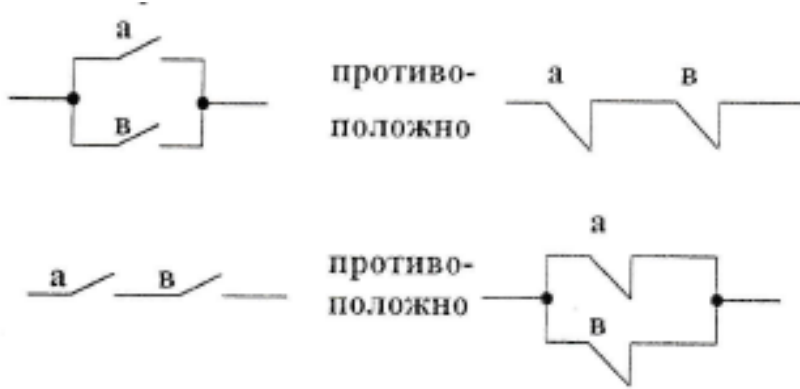
2. Сполучний



3. Розподілюючий

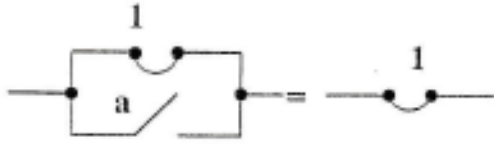


4. Інверсійний



Рівності, що відрізняються від звичайної алгебри:

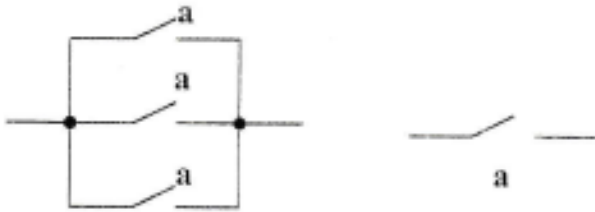
1. $1 + a = 1$



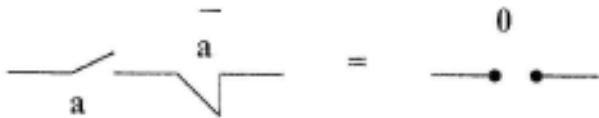
2. $a \cdot a = a$



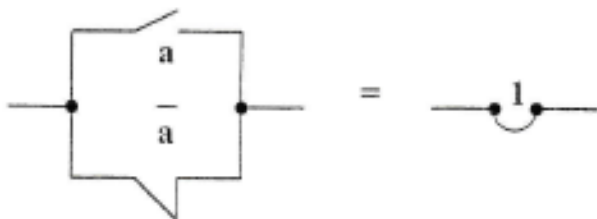
3. $a + a + a = a$



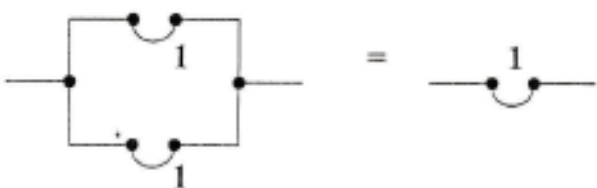
4. $a \cdot \bar{a} = 0$



5. $a + \bar{a} = 1$

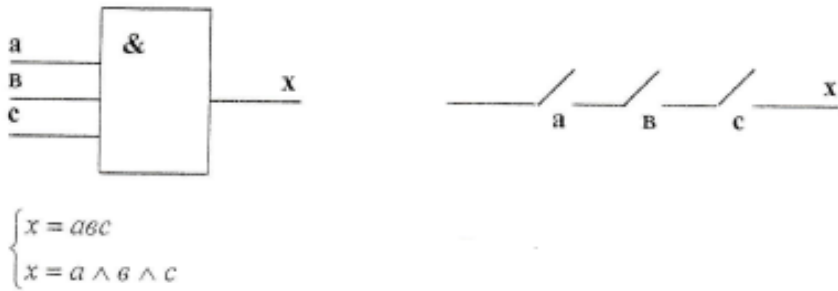


6. $1 + 1 = 1$



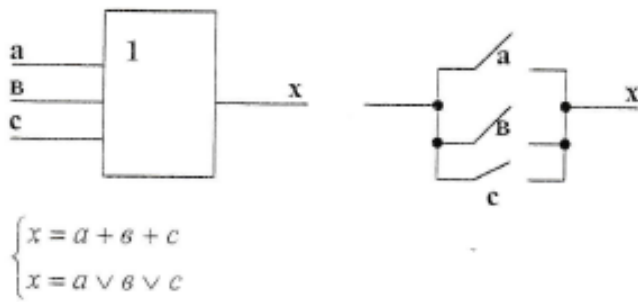
Базові типові елементи релейно-контактних і логічних структур

1. Послідовні з'єднання контактів «І» (логічний елемент «І»):



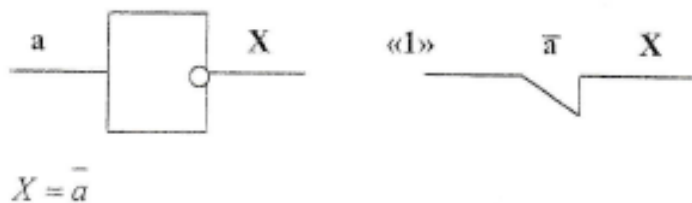
Вихід елемента «І», якщо на всіх трьох входах «1».

2. Паралельне з'єднання контактів «АБО» (логічний елемент «АБО»):



Вихід елемента «І», якщо на одному з входах «1».

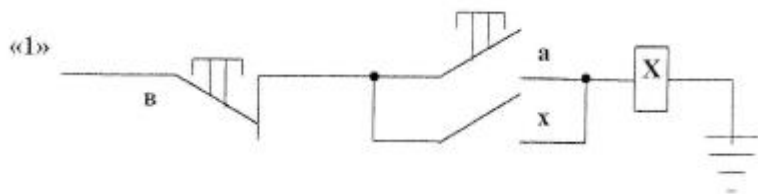
3. Заперечення "НІ" (логічний елемент «АБО-НІ»)



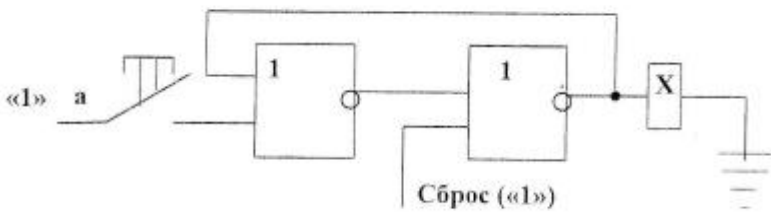
Вихід елемента «І», якщо контактор а відключений.

Типові вузли релейно-контактних і логічних схем

1. Вузол пам'яті (само підхват)

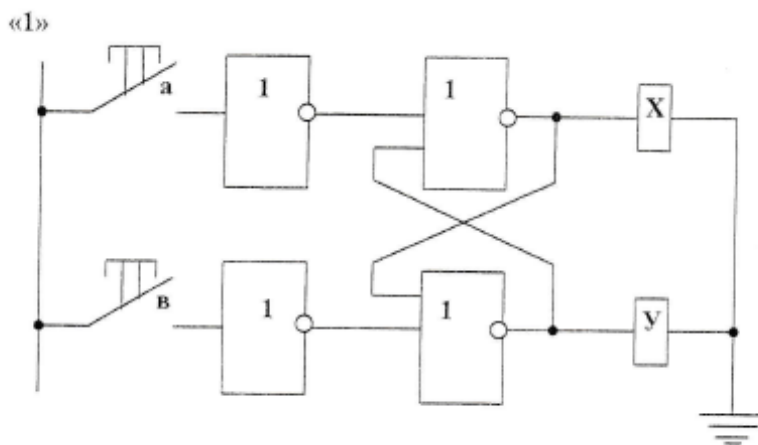
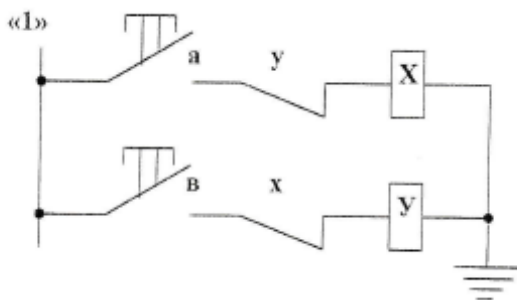


При натисканні кнопки "а" включається реле Х і своїм однойменним контактом «запам'ятає» натиснутий стан "а".



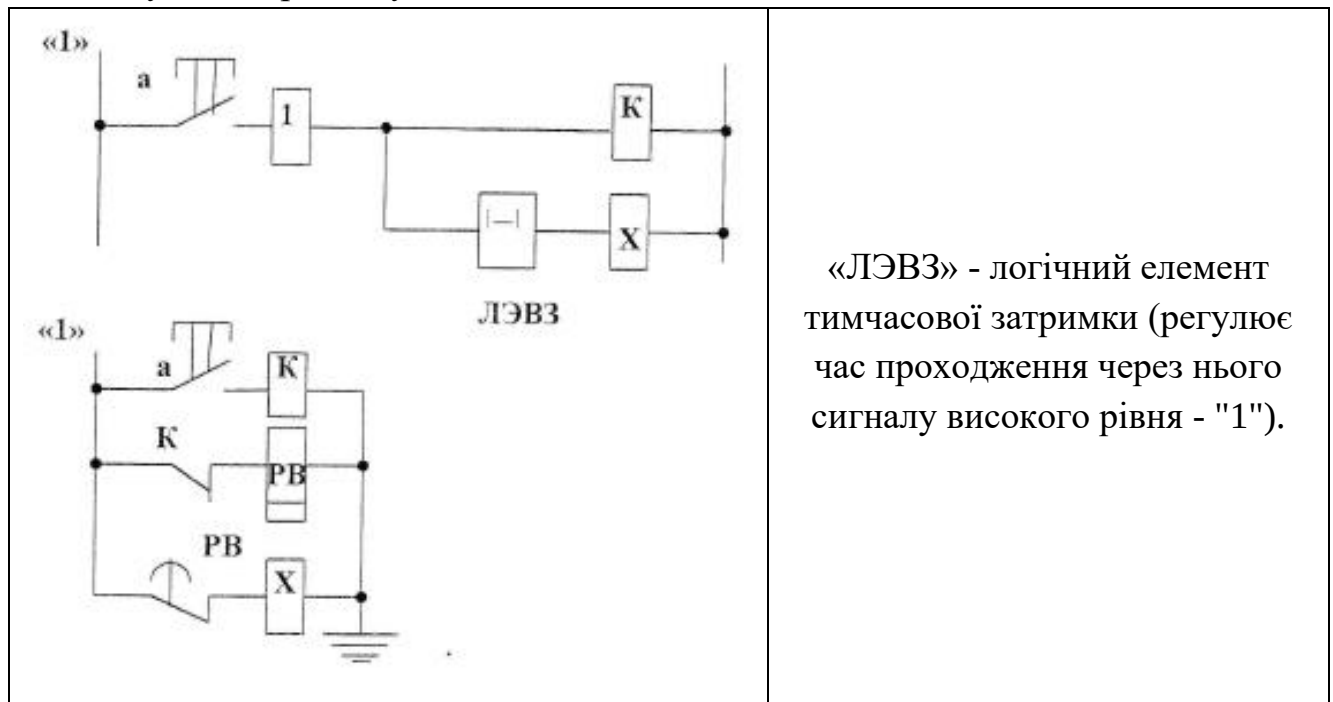
Скидання пам'яті - натискання кнопки «В» або подача «1» на вхід «скидання» в логічній схемі.

2. Блокування електричне

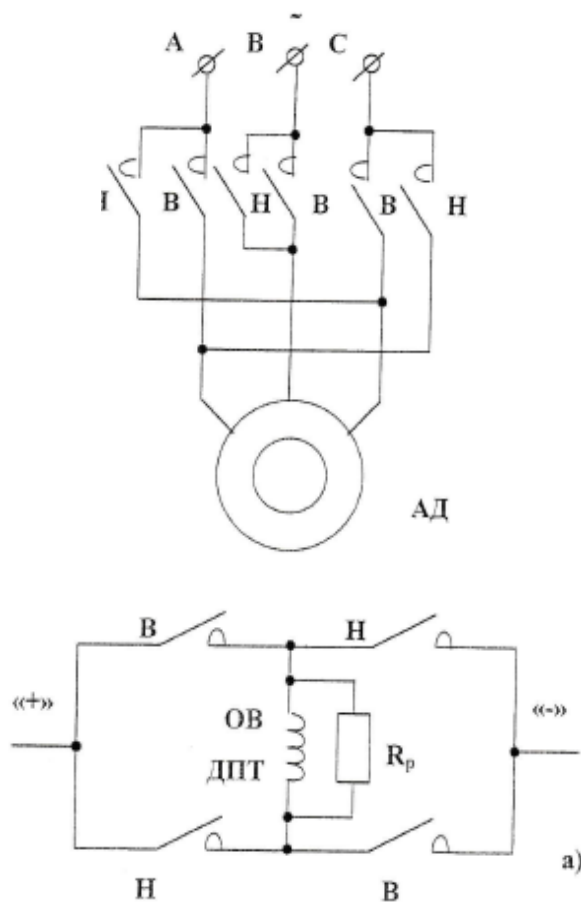


Блокується електричним шляхом одночасна робота реле Х і У

3. Вузол витримки у часі

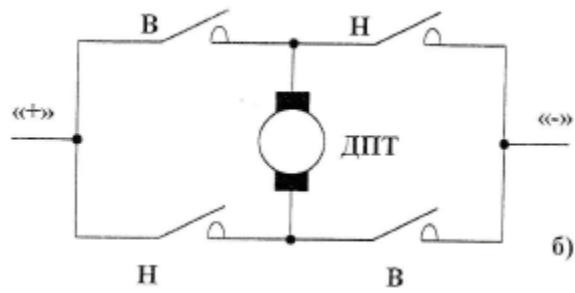


Типові вузли реверсу



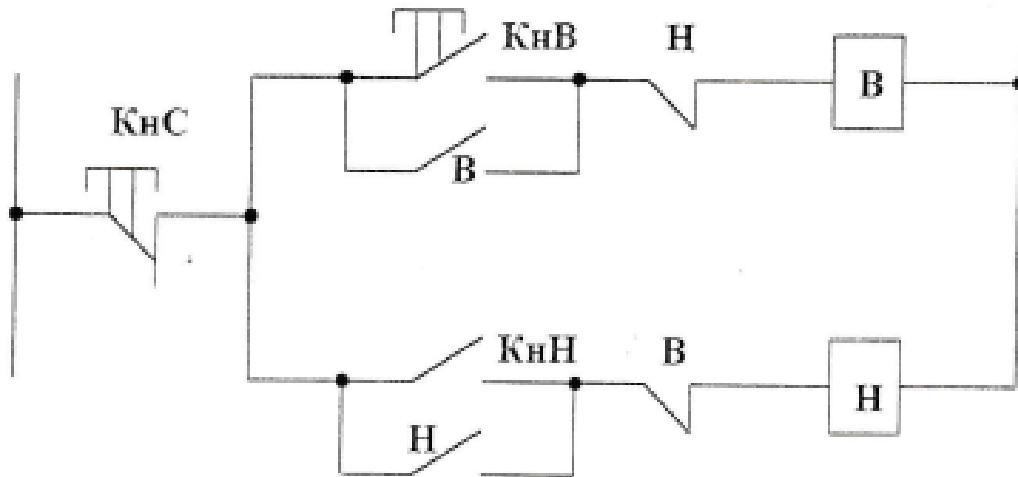
Для асинхронного двигуна (АД) В та Н – відповідно, контакти контакторів «вперед» - В та «назад» - Н.

Для двигуна постійного струму (ДПС):
а) реверс по обмотці збудження;
б) реверс по якорю.

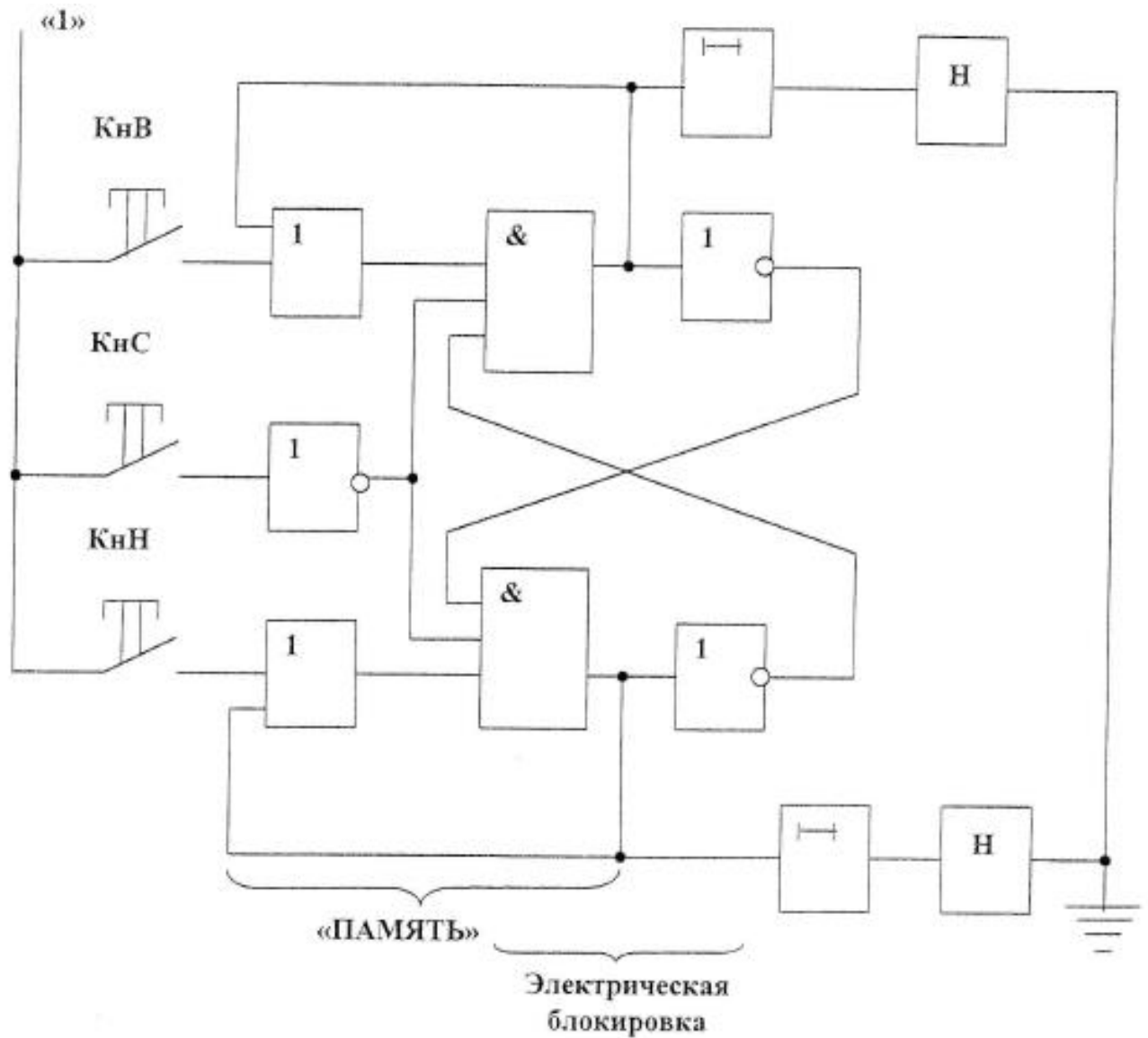


Для ДПС змішаного збудження реверс виконується тільки по якорю.

Релейно-контакторна схема реверсивного пускача



Безконтактна схема реверсивного пускача

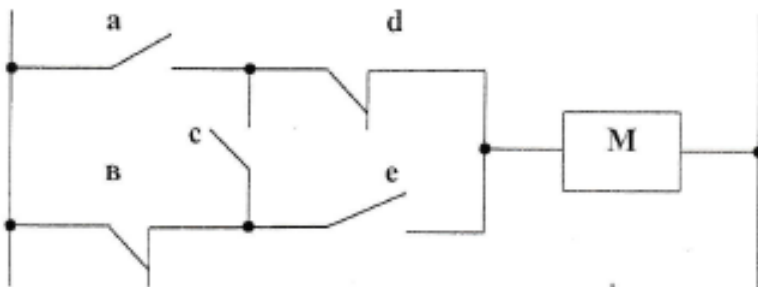


Включення елементів часу в схему необхідно для відновлення властивостей силових безконтактних ключів і керуючих пристроїв при реверсі.

Перетворення релейно-контакторних структур на безконтактні.

Перетворення схем типа «Н» в «П»

Розглянемо фрагмент релейно-контакторної схеми

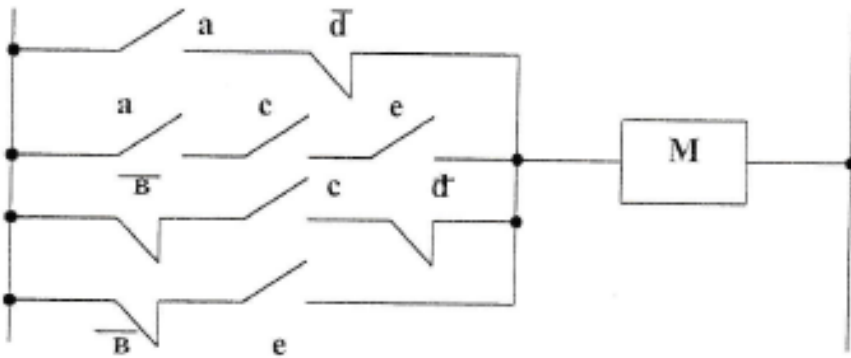


Структури з перехресними гілками називають структурами класу «Н».

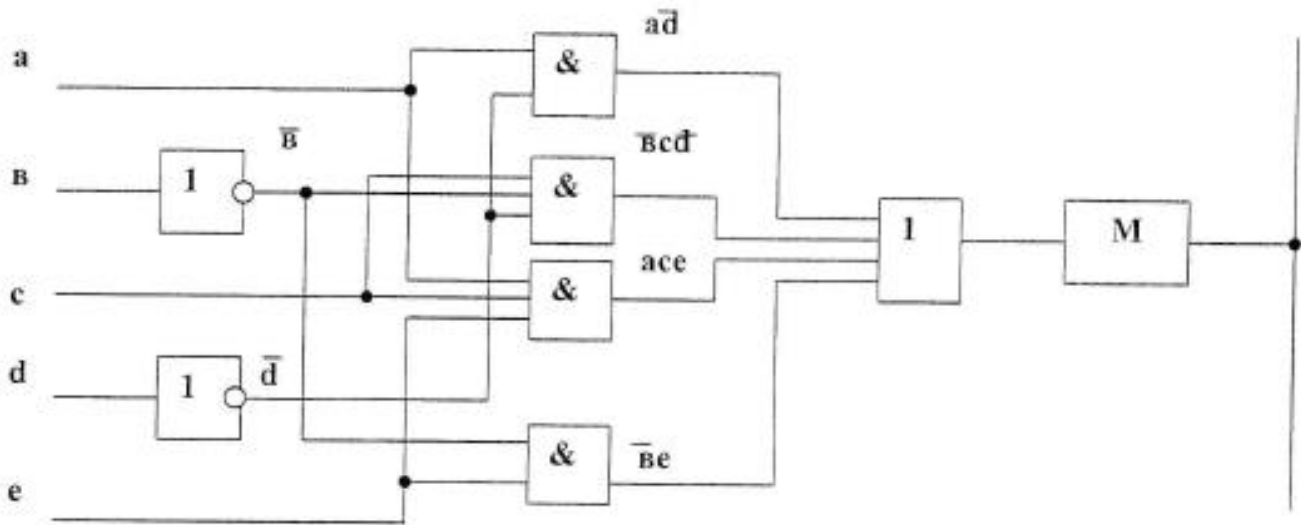
Такі схемні рішення є важко аналізується при необхідності знаходити несправність в схемі. Тому структуру «Н» переводять на структуру "П", що має ряд паралельних гілок. Для цього, використовуючи закони алгебри логіки, складають логічні перемикають функції. Логічна перемикають функція $F(M)$ спрацювання контактора M має вигляд:

$$F(M) = a\bar{d} + ace + \bar{b}cd + \bar{b}e = a(\bar{d} + ce) + \bar{b}(cd + e)$$

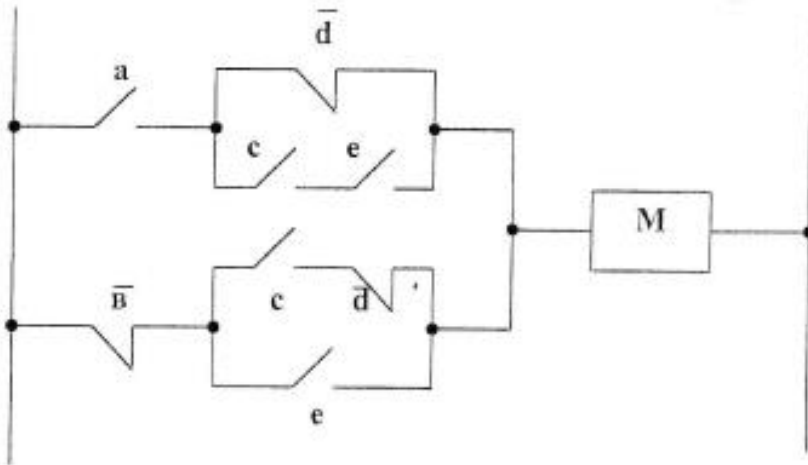
Будемо працювати з першою частиною виразу: складемо структуру класу «П» та реалізуємо усе на базі логіки. Варіант схеми «П» має вигляд:



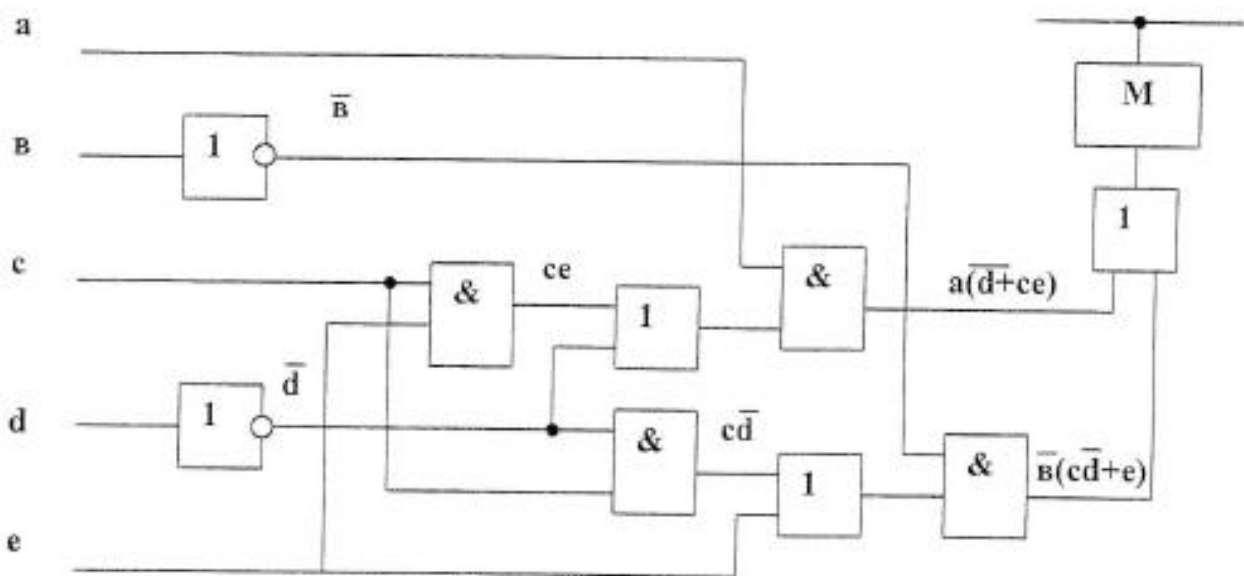
Логічна схема керування має вигляд:



Тепер зробимо те ж саме для другої частини виразу. Варіант схеми «П»:



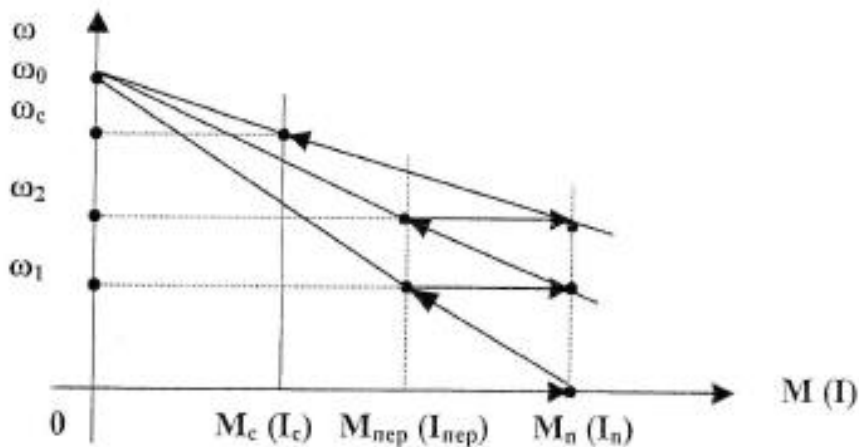
Логічна схема керування:



Як видно, більш економічним є перший варіант логічної схеми (має меншу кількість елементарних блоків).

Принципи керування СКЕП з багатоактним керуванням

Для прикладу роздивимося двоступінчасту пускову діаграму ДПС



З пускової діаграми видно:

- 1) контролюючи моменти, при яких струм спадає до значення струму перемикання $I_{\text{пер}}$, можна реалізувати принцип управління у функції струму;
- 2) контролюючи час до досягнення струму перемикання $I_{\text{пер}}$ на кожній пусковий ступені, реалізується принцип управління у функції часу;
- 3) контролюючи моменти досягнення приводом значень швидкостей ω_1, ω_2 і т.д., реалізується принцип управління у функції швидкості;
- 4) можливий також принцип управління у функції шляху.

Принцип керування у функції часу

Принцип управління у функції часу заснований на розрахунку і відпрацювання часу роботи приводу на кожній пусковий ступені. З подачею напруги живляться обмотка збудження ОВ і І РУ, яке миттєво відкидає свій контакт в ланцюзі контакторів 1У і 2У.

Натисканням кнопки пуску КП здійснюємо включення контактора Л, ставиться кнопка на самопідхоплення, а силовим контактом подається напруга на якір ДПТ (пуск з повним введенням R). Від кидка пускового струму спрацьовує реле 2РУ, відключає свій контакт в ланцюзі контактора 2У. Одночасно контактор Л своїм блок-контактом обезструмлює І РУ, яке контролює час пуску на 1-го ступеня. Після закінчення часу роботи двигуна на першій ступені контакт І РУ замикається, включаючи І У, який своїм силовим контактом шунтує 1-у частину R і реле часу 2РУ. Починається відлік часу роботи двигуна на другу пускову ступені. Після закінчення розрахункового часу, замикається контакт 2РУ, спрацьовує контактор 2У, шунтуючи другу частину пускового опору і переводячи двигун на роботу на природній характеристиці.

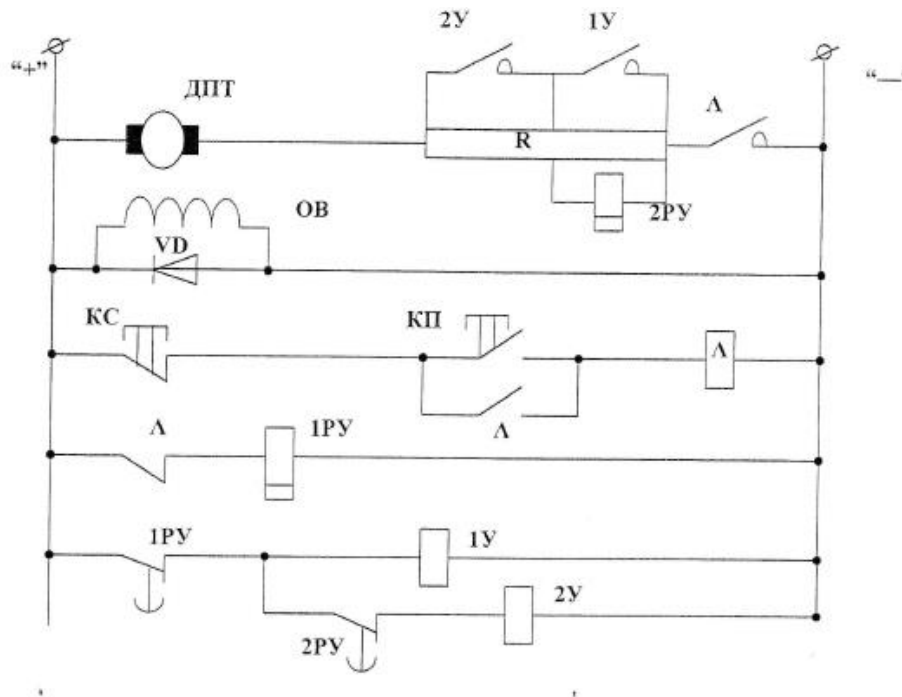
Час роботи двигуна на кожній пусковій ділянці:

$$t_{\omega} = Tm_i \cdot \ln \frac{I_n - I_c}{I_{\text{пер}} - I_c}$$

де Tm_i – електромеханічна постійна часу роботи приводу на i -ой ступені:

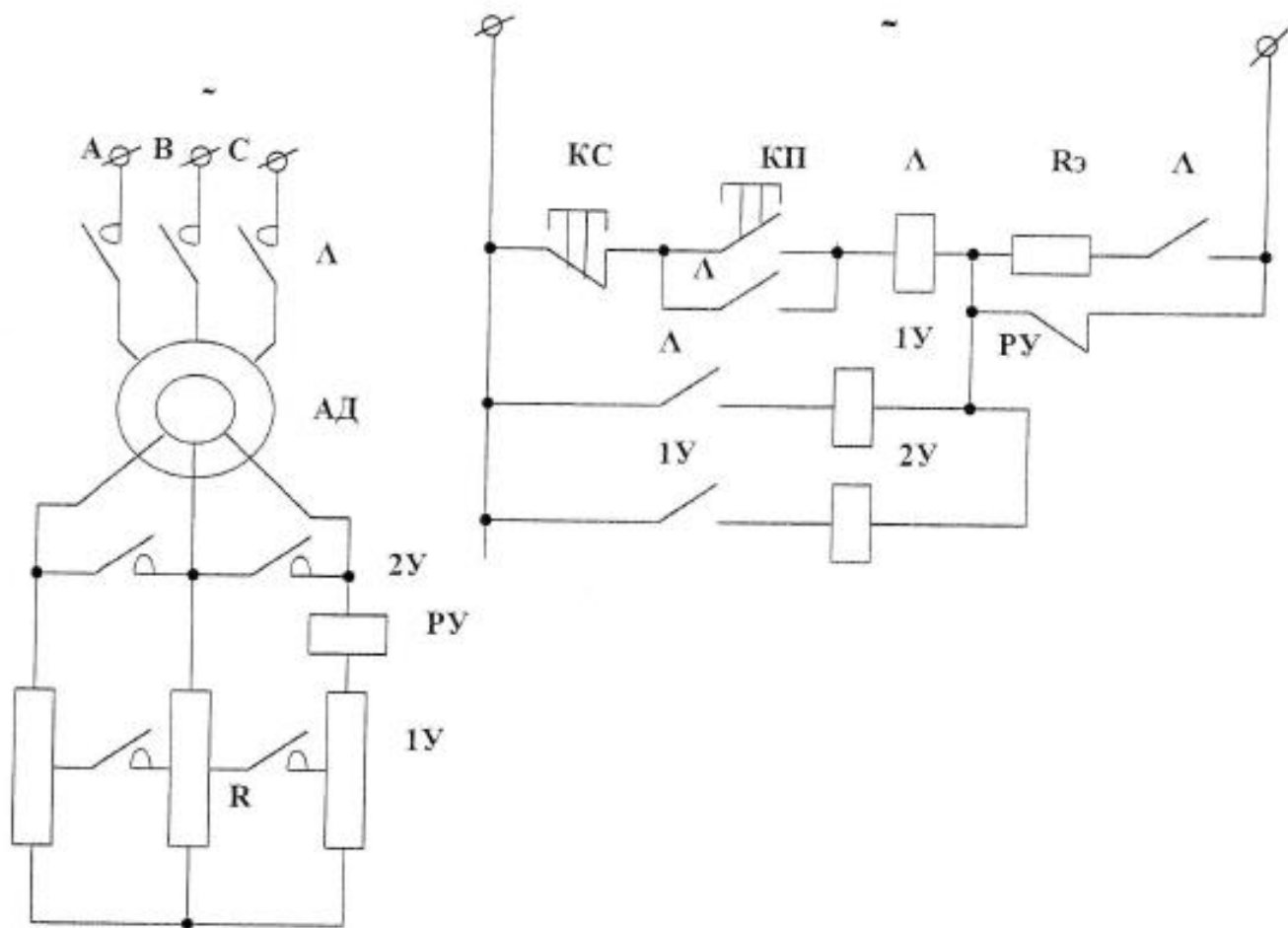
$$Tm_i = \frac{j_0 R_i}{K_e K_m};$$

$I_n, I_{пер}, I_c$ – відповідно, пусковий струм, струм переключення та статичний струм (з пускової діаграми); j_0 – сумарний момент інерції привода; K_e, K_m – коефіцієнти ЕРС і моменту двигуна, відповідно; R_i – сумарний опір силової ланки на i -ой пусковій ступені.



Принцип керування у функції струму

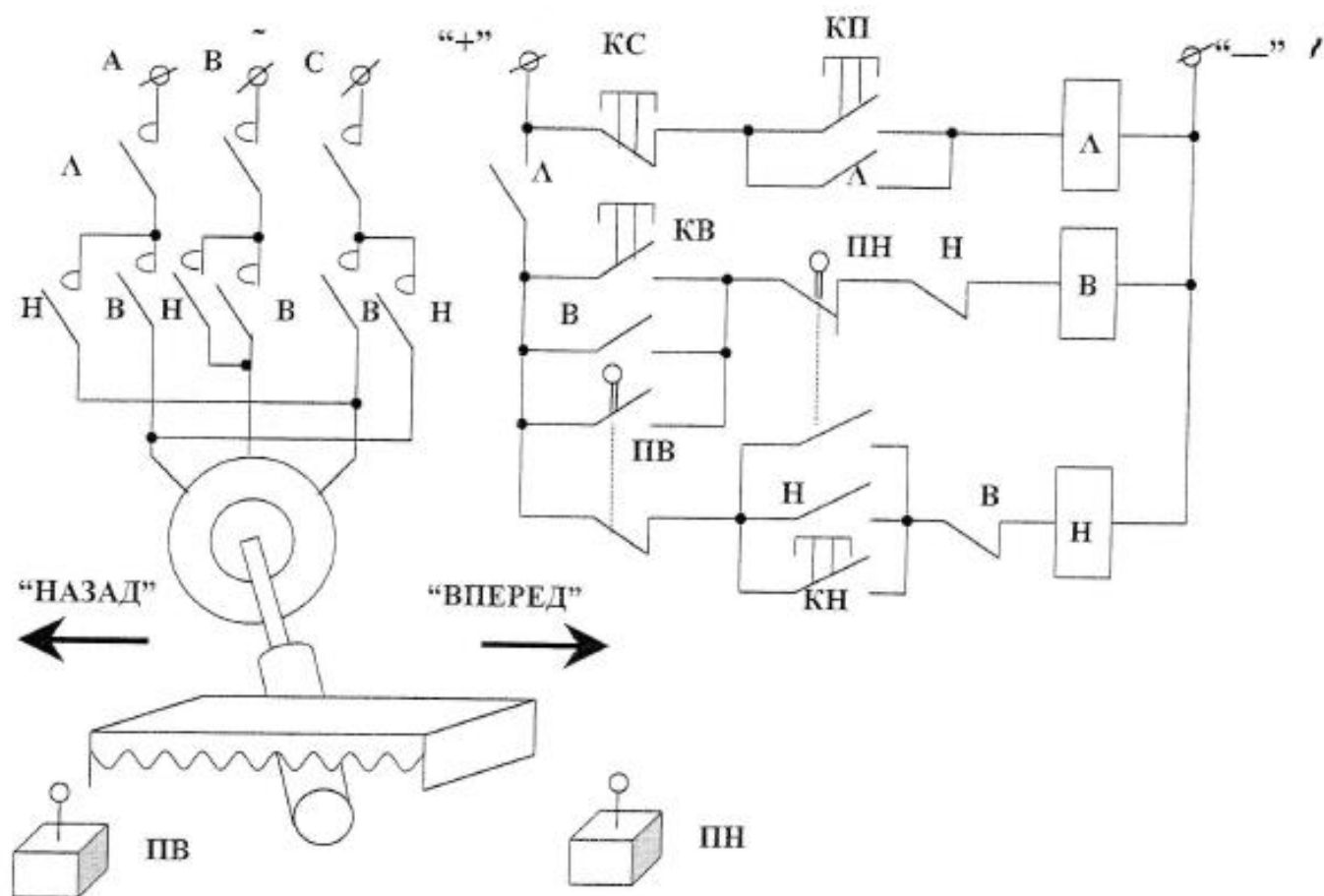
Запуск двигуна починається з натискання КП, при цьому втягується контактор Л, ставлячи кнопку на самопідхоплення, підключаючи статор двигуна до мережі: починається розгін двигуна з пів-ністю введеним опором R. Від кидка струму втягується струмове реле РУ ($I_{ср} = I_n$, $I_{отп} = I_{пер}$), розмикаючи свій блок-контакт. При цьому підживлення контактора 1У здійснюється через R_e , тому він не втягується. При спаданні струму до $I_{пер}$ відпускається РУ, яке через свій блок-контакт безпосередньо живить 1У, який втягується, шунтуючи першу частину R, і підключає 2У. Однак 2У не втягувати, оскільки від кидка струму спрацьовує РУ і здійснювати живлення 2У через R_e . Шунтування другого ступеня пускового опору буде здійснено при спаданні струму до $I_{пер}$ (аналогічно шунтування першої пускової ступені).



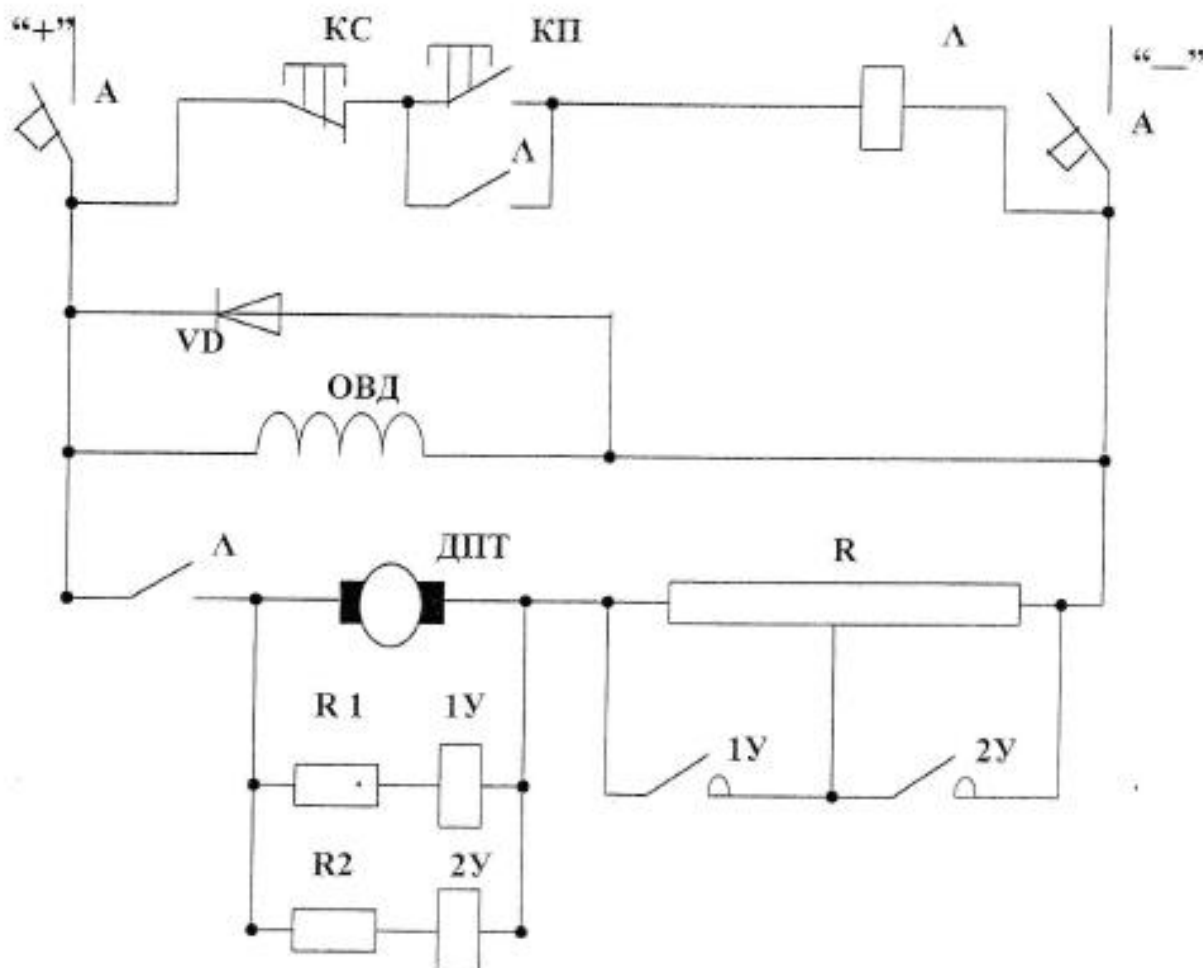
Принцип керування у функції шляху

Управління тут виробляється за допомогою колійних (кінцевих) вимикачів з двох ланцюгової механічним зв'язком ПН і ПВ.

Механізм, переміщаючись, доходить до певного положення, потім шляховий вимикач автоматично перемикає електропривод на інше (реверсивний) напрямом обертання і т.д.



Принцип керування у функції швидкості



При досягненні швидкості зі 1 (пускова діаграма) спрацьовує контактор 1У, шунтуючи першу частину пускового опору R. При досягненні швидкості со2 спрацьовує контактор 2У, шунтуючи решту пускового опору, і переводячи ДПТ на природну характеристику.

Порівняльний аналіз принципів управління

I. У функції струму:

1) переваги:

- дозволяє безпосередньо контролювати поточне значення струму і видавати команди на перемикання.

2) недоліки:

- з огляду на низьку точності настройки струмових реле можливі затяжні пуски або «застрявання» на одній з пускових характеристик (особливо близьких до природної). Зважаючи на це збільшують потужність пускового реостата.

II. До функцій швидкості:

1) переваги:

- простота.

2) недоліки:

- для двигунів постійного струму з незалежним і паралельним збудженням з $\Phi = \text{const}$ чутливі реле повинні вибиратися з урахуванням перевантажень, особливо на, молодших ступенях. Для двигунів змінного струму застосовуються частотні реле, які мають низьку чутливість.

III. У функції часу:

1) переваги:

- висока точність реалізації пускових характеристик.

2) недоліки:

- застосовуються для приводів зі спокійною навантаженням і постійним моментом інерції, з цього уставки реле часу вибираються виходячи з найгірших умов роботи.

IV. У функції шляху:

1) переваги:

- універсальність, тобто застосуємо для будь-якої системи приводу.

2) недоліки:

- відсутність прямого контролю фізичних величин, що визначають режим роботи приводу (навантаження, швидкості, часу).

На практиці часто застосовують комбінації вищеназваних принципів управління. Типові вузли управління пуском ДПС. Типові вузли гальмуванням ДПС. Типові вузли управління пуском і гальмуванням АД (Самостійне опрацювання /1, 2, 3, 4/).

ТИПОВІ ВУЗЛИ КЕРУВАННЯ ПУСКОМ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ (СД)

Задачі керування СД

1. Розгін підсинхронної швидкості $\omega = (0,95 \div 0,97)\omega_0$.
2. Втягування у синхронізм (синхронізація) – супроводжується товчкоподібною подачею напруги збудження (U_v).
3. Утримання у синхронізмі – супроводжується форсировкою струму збудження (i_v).
4. Регулювання струму збудження по заданому закону (підтримка $\cos \varphi$).

Для СД застосовують асинхронний пуск, тобто з перемикачів в обмотки ланцюга пуск аналогічний пуску АД.

Розрізняють:

- а) прямий пуск з включенням обмотки статора відразу на повне напруга;
- б) пуск при зниженій напрузі з подальшим перемиканням в функції часу на повне напруга мережі.

Специфічна особливість пуску СД - управління подачею збудження в його обмотку. Якщо дозволяє мережу і двигун, використовують прямий пуск з наглухо приєднаним збудником (при $M_c \leq 0,4$ Мн), або з підключенням збудника на підсинхронних швидкості (при $M_c > 0,4$ Мн).

Якщо прямий пуск неприпустимий, двигун запускається при зниженій напрузі.

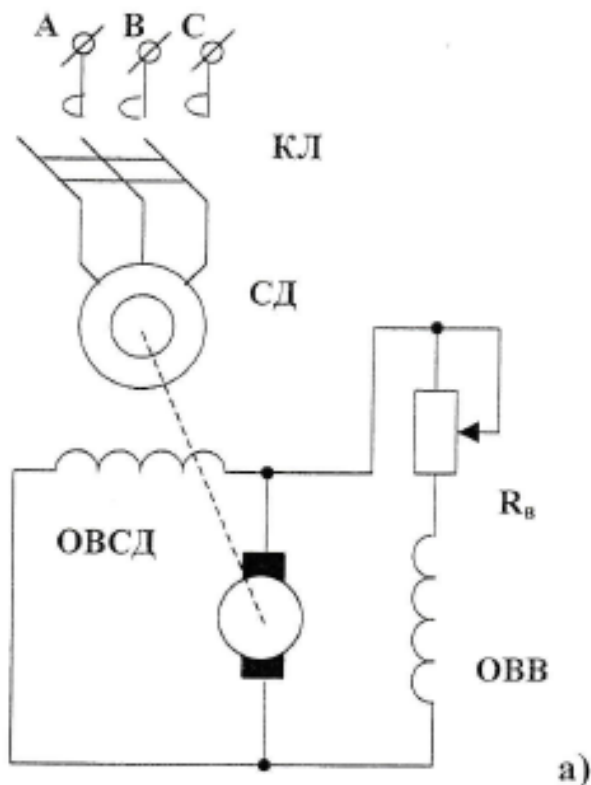
Розрізняють:

- 1) легкий пуск, при якому порушення подається до включення обмоток статора на повне напруга (при незначному M_c);
- 2) важкий пуск, при якому порушення подається при повній напрузі мережі на статорі (при значному M_c).

Реакторний і автотрансформаторним пуски застосовні для двигунів напругою понад 1000 В, резисторний пуск використовується при потужності двигуна від 1 до 400 кВт напругою до 1000 В.

Типові схеми керування СД

Схема а). Тут операція управління пуском здійснюється силовими контактами кін тактора КЛ (на схемі не показаний), які підключають статорних обмотку СД до мережі. У міру розгону двигуна збільшується напруга збудника, який знаходиться на одному валу з СД, і напруга якого на підсинхронних швидкості буде достатнім для втягування двигуна в синхронізм.



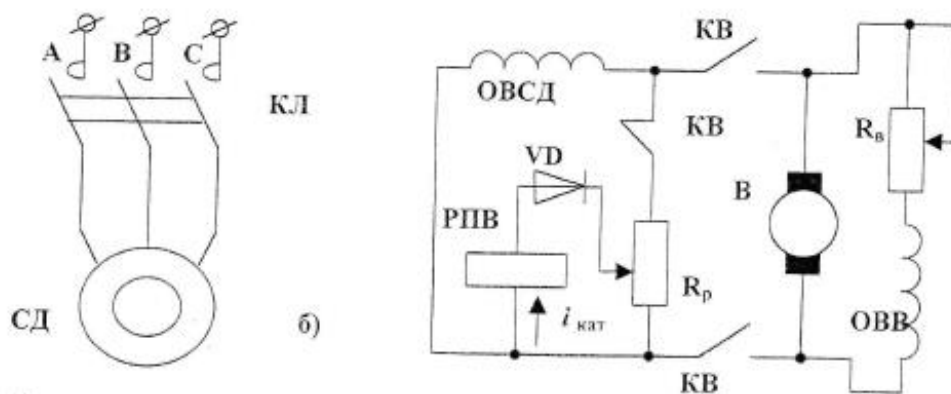
Схеми б) і в). Схеми використовуються для більш важких умов пуску. Починається пуск з включення контактора КЛ, т. Е. з подачі напруги на статор СД. При цьому котушка контактора подачі збудження (КВ) знеструмлена. ОВ СД при цьому або замкнута на розрядний різі стор R_p (схема б), або включена послідовно з ним (схема в). При досягненні підсинхронних швидкості включається контактор КВ, під'єднуючи ОВ безпосередньо до якоря віз будителя. Двигун втягується в синхронізм.

Так як СД працюють зазвичай довго, то використовують контактор КВ з механічною клямкою - навіть при знятті напруги з котушки КВ якір утримується в притягнутому зі стоянні. Цим зберігається збудження двигуна навіть при зникненні напруги в ланцюзі управління.

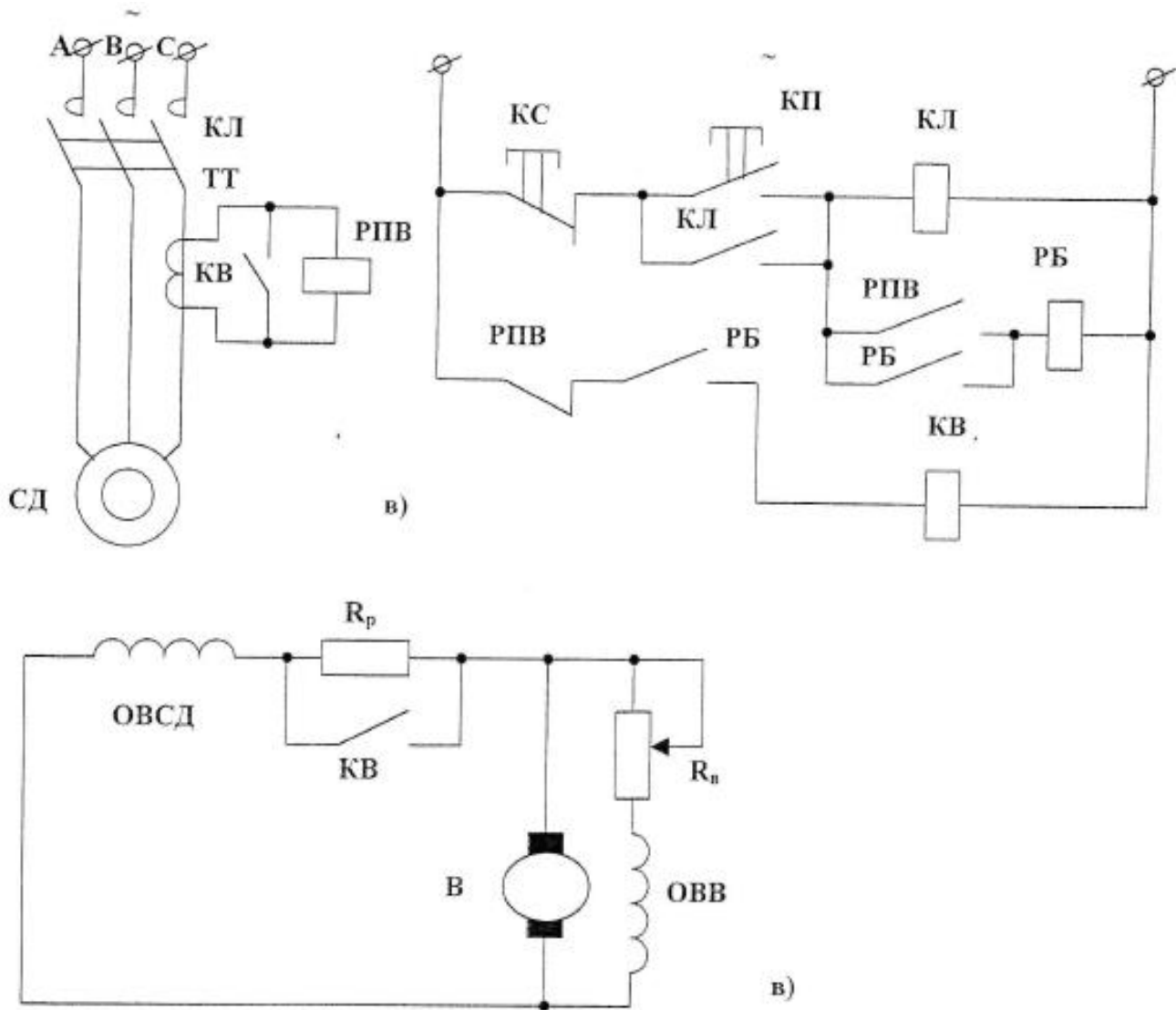
Подачею збудження керують в функції швидкості або функції струму статора.

Перший спосіб - (схема б) реалізується за допомогою електромагнітного реле постійного струму РПВ, котушка якого через діод VD включається на розрядний опір R_p . При підключенні статора до мережі в ОВ СД наводяться змінна однофазна ЕРС. За котушці РПВ / починає протікати випрямлений діодом струм ікат у вигляді імпульсів, амплітуда і частота яких пропорційна ковзанню S . У початковий період пуску ($S = 1$) імпульси великі, інтервали між ними невеликі - реле РПВ включено. У міру розгону двигуна амплітуда імпульсів зменшується, інтервали між ними збільшуються. При досягненні СД підсинхронних швидкості величина потоку, що наводиться в котушці, стане рівною потоку відпускання реле, що призведе до включення контактора КВ і переключенню ОВ СД на збудник. Даний спосіб використовується не часто, так як не забезпечує чіткого входження СД в синхронізм через розкиду витягів часу реле РПВ.

Зазвичай використовується пуск в функції струму статора (схема в). Струмове реле РПВ отримує харчування від трансформатора струму ТТ. При асинхронному пуску струм статора зазвичай різко зменшується в зоні підсинхронних швидкостей. Ця обставина і використовується для фіксації моменту подачі збудження.



При натисканні кнопки пуск (КП) втягується лінійний контактор КЛ, підключаючи статор синхронного двигуна до мережі. Від кидка пускового струму спрацьовує реле подачі збудження РПВ, втягується реле блокування РБ, яке своїм контактом ставиться на самоподпітку, і відключається контактор подачі збудження КВ. Обмотка збудження ОВ СД виявляється включеною послідовно з розрядним резистором до збудника. При досягненні під синхронної швидкості відпускається РПВ, втягується КВ, підключаючи збудник до ОВ СД безпосередньо, забезпечуючи необхідну форсировку при втягуванні двигуна в синхронізм. Своїм контактом КВ шунтирует РПВ, запобігаючи його повторне спрацьовування від кидка то ка при втягуванні двигуна в синхронізм.



Типові вузли електричного захисту двигунів і схем управління

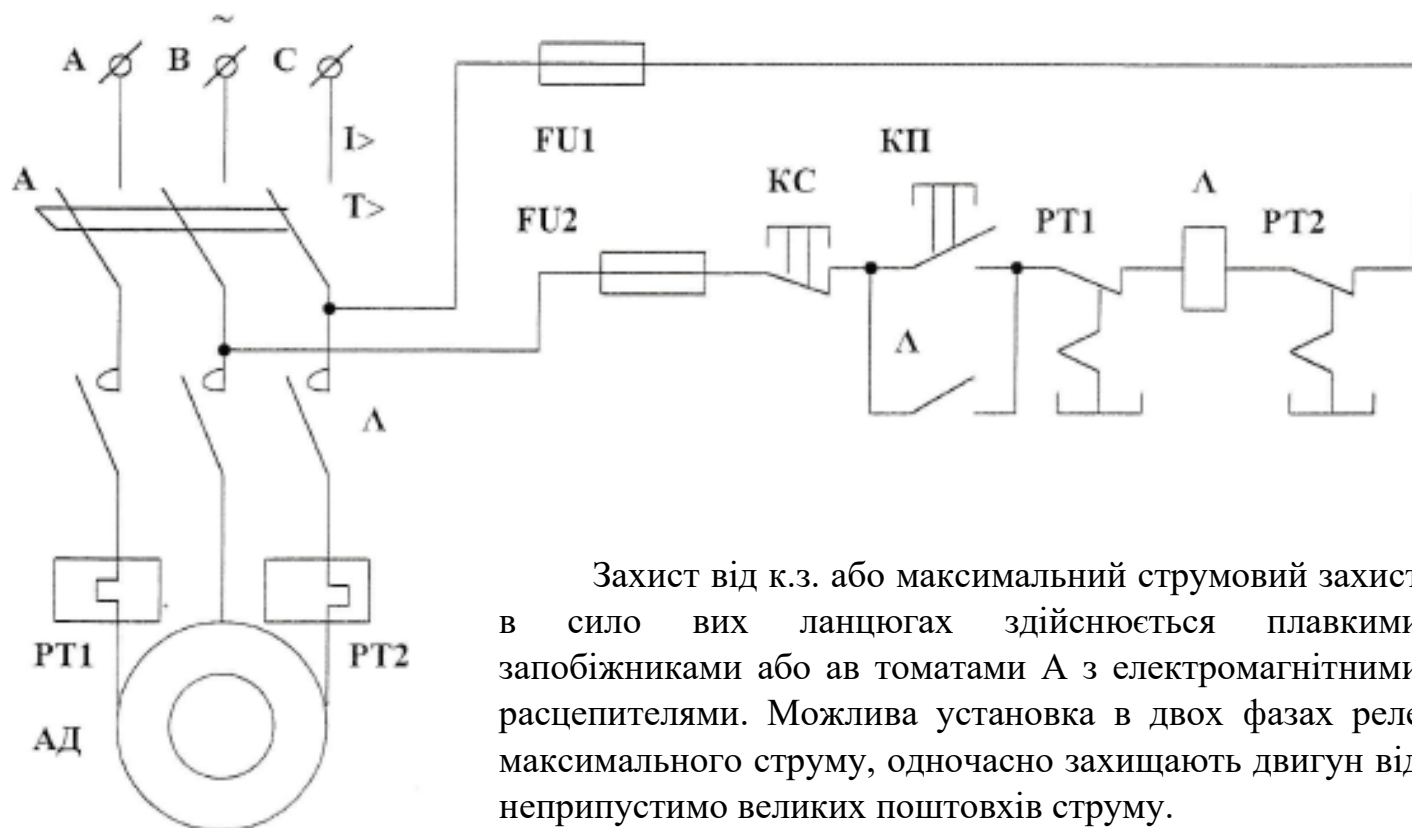
Вимоги до захисту:

- 1) вибірковість (селективність);
- 2) точність і надійність;
- 3) задане швидкодію.

Розглянемо наступні види захистів:

- 1) захист від коротких замикань в силових ланцюгах і ланцюгах управління;
- 2) захист від перегріву;
- 3) захист від самозапуску;
- 4) захист від обриву поля збудження;
- 5) захист від перенапруг;
- 6) захист від випадінь з синхронізму СД;
- 7) захист від затяжних пусків СД;
- 8) захист ланцюгів управління;
- 9) захисні блокування.

Захист від коротких замикань (к.з.) у силових ланцюгах та ланцюгах керування



Захист від к.з. або максимальний струмовий захист в силових ланцюгах здійснюється плавкими запобіжниками або автоматами А з електромагнітними расцепителями. Можлива установка в двох фазах реле максимального струму, одночасно захищають двигун від неприпустимо великих поштовхів струму.

Ланцюги управління захищаються або тими ж апаратами, що і силові ланцюги (при $P_{дв} < 10$ кВт), або своїми плавкими запобіжниками або автоматами.

Вибір струму уставки $I_{уст}$ (струму спрацьовування) автомата або максимального токового реле і номінального струму плавкої вставки $I_{вст н}$ запобіжника проводиться таким чином:

1. Для захисту АД з короткозамкнутим ротором:

- при часу пуску $t_{п} < 5$ с – $I_{вст н} \geq 0,4 I_{пуск}$, де $I_{пуск}$ пусковий струм АД;
- при великій частоті пусків – $I_{вст н} \geq (0,5 \dots 0,6) I_{пуск}$;
- при $t_{п} > 10$ с – $I_{вст н} \geq (0,5 \dots 0,6) I_{пуск}$;
- незалежно від умов пуску – $I_{уст} = (1,3 \dots 1,5) I_{пуск}$.

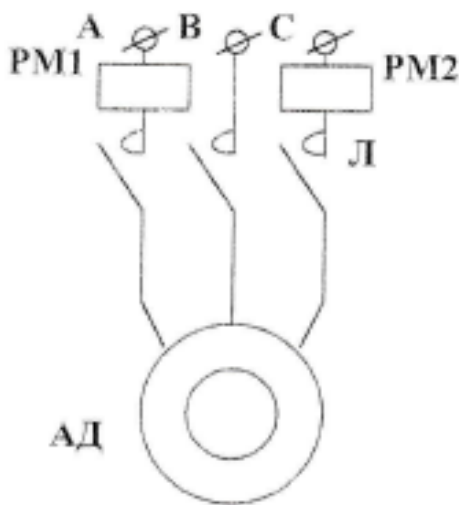
2. Для захисту АД з фазним ротором і ДПТ:

$$I_{вст н} = (1,15 \dots 1,25) I_{н}; I_{уст} = (1,2 \dots 1,3) I_{пуск}, \text{ де } I_{н} - \text{номінальний струм двигуна.}$$

3. Для захисту ланцюгів управління:

$$I_{уст} = 2,5 I_{кат \Sigma max}, \text{ де } I_{кат \Sigma max} - \text{сумарний струм котушок максимальної кількості одночасно включених апаратів.}$$

Захист електродвигуна від перегріву, викликаного перенавантаженням по струму



Цей вид захисту здійснюється:

а) при тривалому режимі роботи - за допомогою 2-х автоматів з тепловим розчеплювачем або 2-х теплових реле РТ 1 і РТ2;

б) при повторно-короткочасному режимі і великій частоті пусків - за допомогою 2-х реле максимального струму РМ 1 і РМ2.

Для того, щоб реле максимального струму не спрацьовувало в період пуску, в схему вводиться реле часу, яке своїм контактом на час пуску шунтує контакти реле.

Номінальний струм нагрівального елемента теплового реле або теплового розчеплювача автомата вибирається приблизно з умови рівності номінального струму двигуна. Струм уставки максимальних струмових реле вибирається з умови:

$$I_{3\phi} < I_{уст} < I_{2\phi}$$

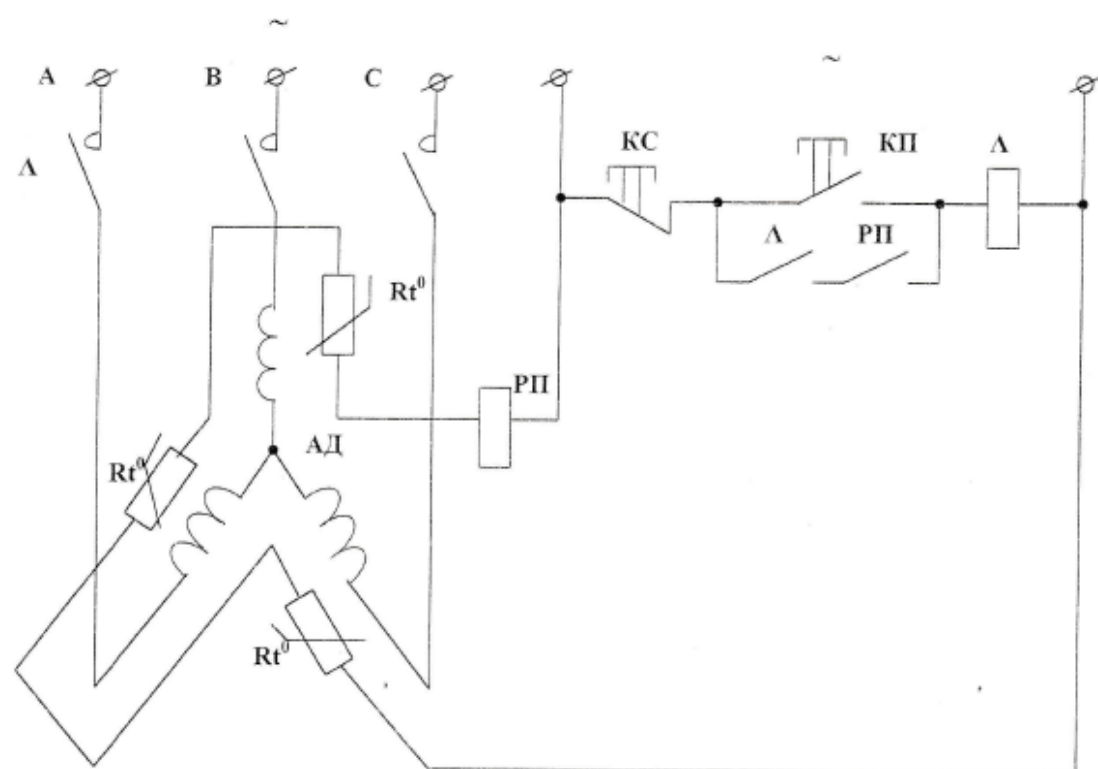
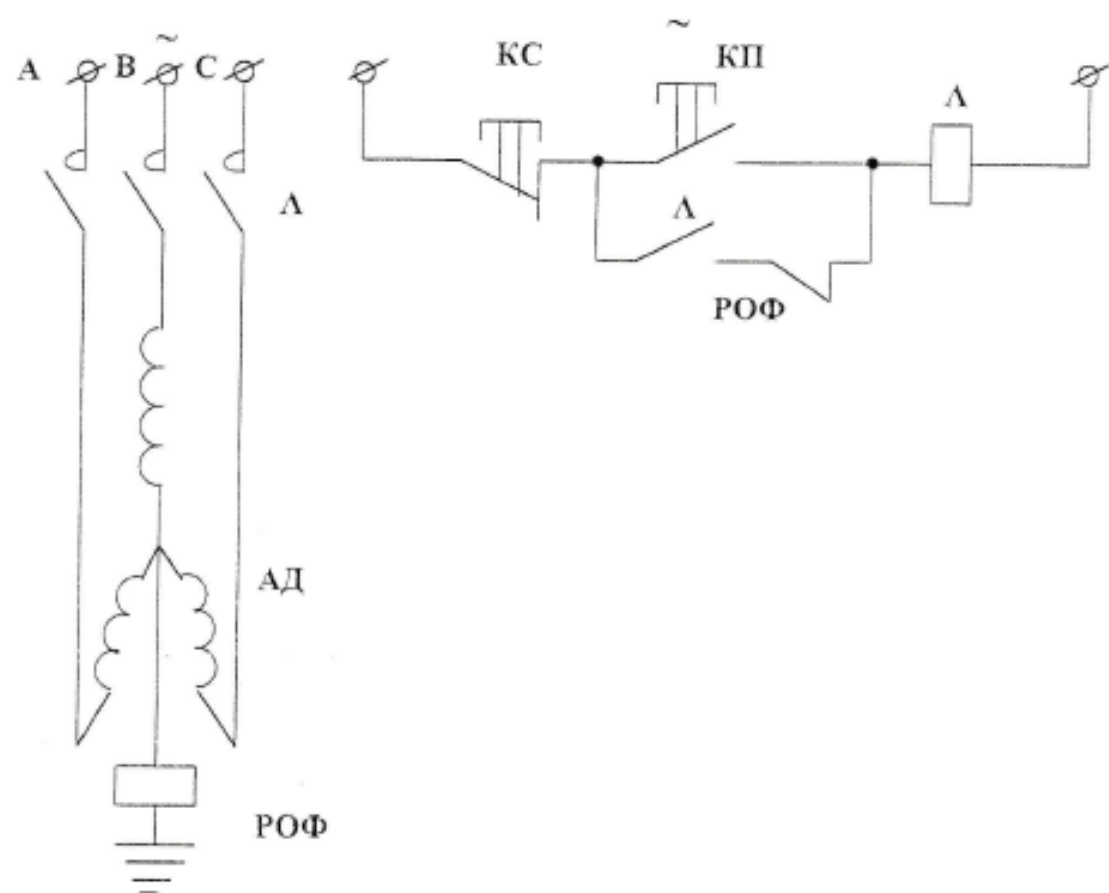
де $I_{2\phi}$ – фазний струм двигуна при роботі на двох фазах; $I_{3\phi}$ – фазний струм двигуна при роботі на трьох фазах.

Для АД з короткозамкненим ротором, захищених, тільки плавкими запобіжниками, окремо застосовується захист від роботи на двох фазах.

У нормальному режимі напруга на реле обриву фази (РОФ) дорівнює 0. При обриві однієї з фаз на ньому з'являється напруга, що призводить до його спрацьовування. Напруга спрацьовування вибирається в межах 10 ... 30% від номінального фазного напруги

Як реалізують температурний захист від перегріву. часто використовують чутливі елементи - позистори, які закладаються в обмотки статора послідовно з котушкою проміжного реле РП.

При перегрів однієї з обмоток різко збільшується опір позистора, що призводить до відключення РП і, зі відповідально, схеми.

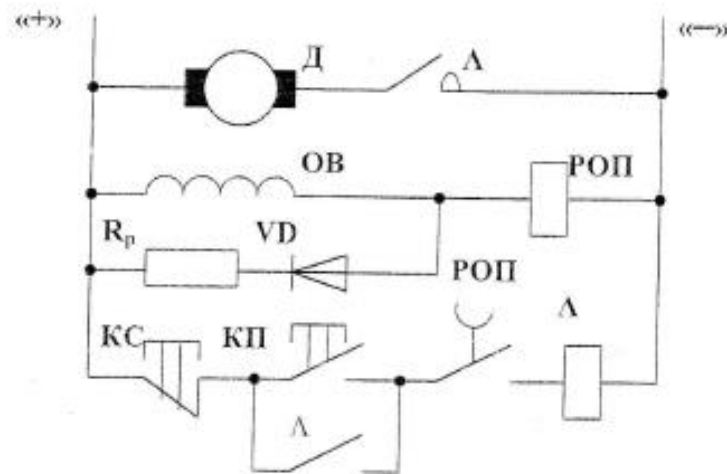


Нульовий захист або захист від самопуску

Здійснюється за допомогою силових лінійних контакторів. Працює даний вид захисту і ти в такий спосіб: при зниженні або зникненні напруги мережі лінійний контактор відключається і відключає двигун від мережі. Причому, при відновленні напруги, повторне включення двигуна неможливо. Якщо управління схемою ведеться від командоконтроллера, цю функцію виконує спеціальне реле напруги. Повторний запуск можливий тільки при установці контролера в «нульове» положення.

Захист ДПС від обриву поля збудження та перенапруг

РОП (реле обриву поля) - мінімальнеструмове реле, втягується при токах збудження близьких до номінальних. При обриві обмотки збудження (ОВ) РОП відпускає свій кін такт з витримкою часу в ланцюзі управління, відключаючи всю схему.



Витримка часу необхідна для підтримки схеми в робочому стані при короткотимчасовому зникненні напруги.

Захист від перенапруг здійснюється шунтуванням ОВ резисторно-діодним R_p VD ланцюгом. Діод включається для зниження втрат розряду: $R_p = (6 \dots 8) R_{ов}$ при $U_n = 220V$ і $R_p = (3 \dots 5) R_{ов}$ при $U_n = 110V$.

Захист СД

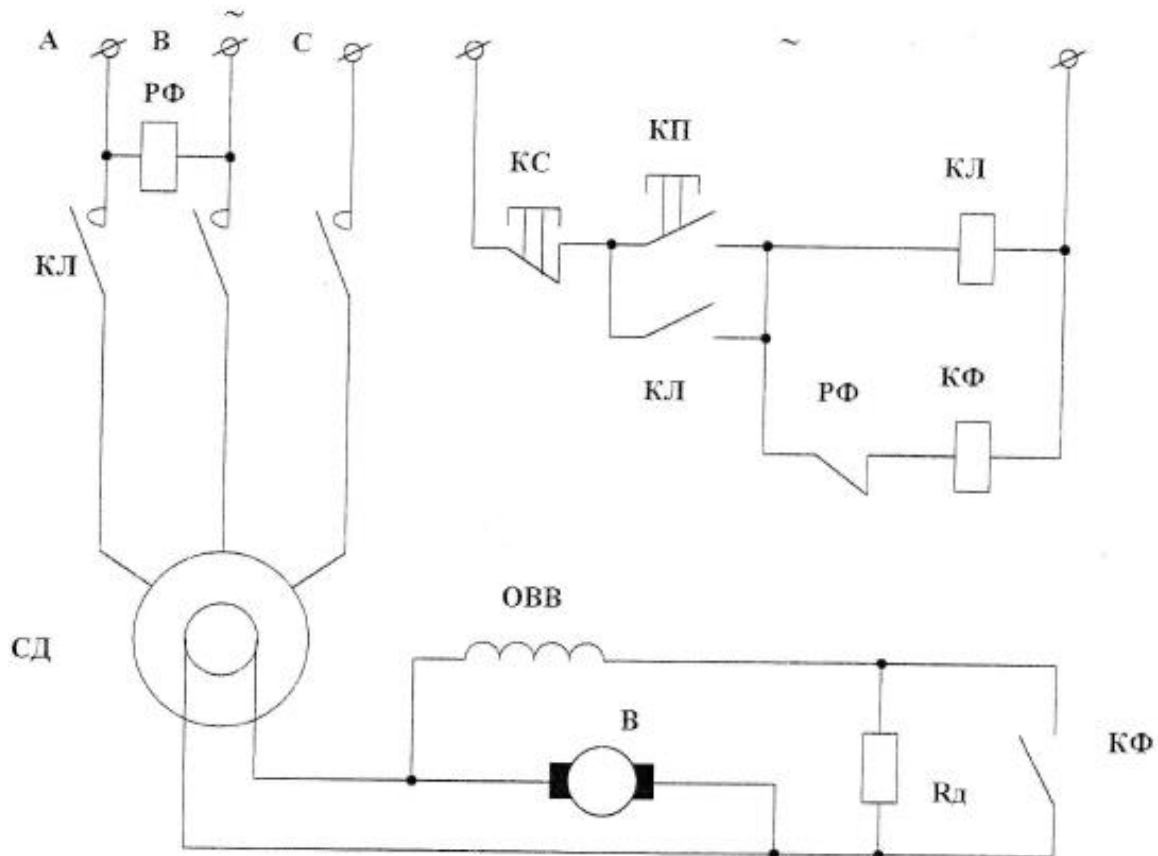
Захист від обриву поля СД та затяжного пуску СД

Здійснюється за допомогою РОП, яке своїм контактом включає проміжне реле, подає харчування на відключає котушку контактора. Реле має короткочасну витримку часу, запобігаючи відключення двигуна при незначних коливаннях напруги.

При затяжному: пуску захист здійснюється за допомогою реле часу і РОП. За скінченням часу, розрахованого на пуск, контакт реле часу замикається в ланцюзі проміжного реле. Якщо при цьому РОП не включили, то проміжне реле спрацьовує, відключаючи двигун (ланцюг живлення проміжного реле РП не показаний).

Захист СД від випадання з синхронізму

Для утримання двигуна в синхронізмі в схемі використовується вузол форсування, що містить реле форсування РФ і контактор форсування КФ. У нормальному режимі РФ втягнуто і його контакт в ланцюзі КФ розімкнута. З натисканням КП подається напруга на СД. При зниженні напруги живлення на 15 ... 20% РФ відпускається, включаючи КФ, і подаючи на ОВВ повне напруга. Зі збільшенням U_B зростає i_B і $M_{\text{шхх}}$ синхронного двигуна.



Захисні блокування підвищують надійність роботи приводу, запобігаючи помилковій спрацюванню апаратів і пристроїв. Такого роду захисту можуть здійснюватися, як за допомогою електричних, так і механічних блокувань (були описані раніше).

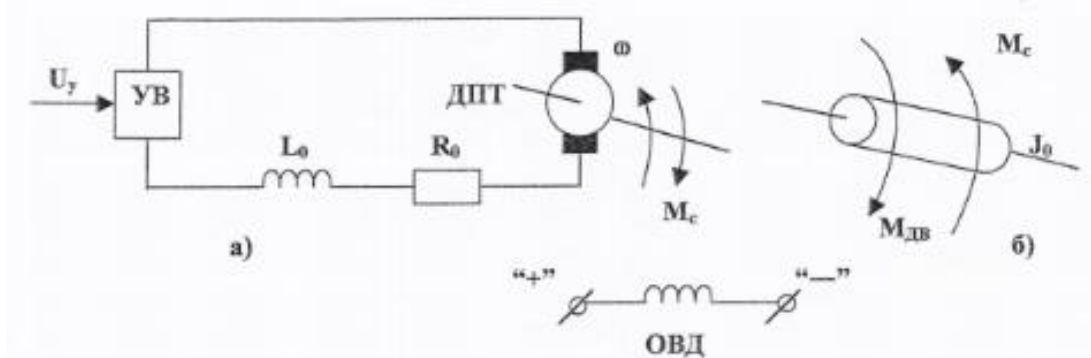
ЧАСТИНА 2

Замкнуті СУЕП

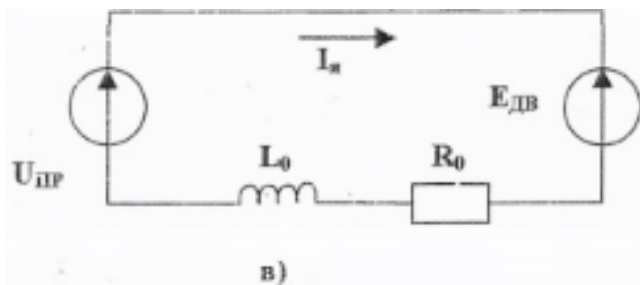
Структурне подання електроприводу постійного струму.

Передавальні функції (ПФ) по керуючому і збуджуючому впливах

Розглянемо вихідні структури приводу постійного струму:



Позначення на малюнках:



L_0 і R_0 - сумарні індуктивність і активний опір контуру, складаються з індуктивностей і опорів джерела живлення, якірного ланцюга двигуна, та $U_{пр}$ - випрямлена напруга керованого випрямляча (УВ);

Едв - проти-ЕРС двигуна; J_0 - сумарний момент інерції ЕП, приведений до валу двигуна.

Допущення:

1. ЕП має постійні параметри, зокрема, двигун має індуктивність L_a і активний опір R_a в гарячому стані:

$R_{яг} = (1,15 \dots 1,25) R_{дв}$, де $(1,15 \dots 1,25)$ – температурний коефіцієнт розширення міді.

2. Реакція якоря скомпенсована, тобто струм якоря не впливає на потік.
3. Момент інерції (механічна частина) представлений еквівалентним моментом інерції J_0 (Рис. Б):

$J_0 = J_{дв} + J'_{мех}$, де $J'_{мех}$ - приведений до валу машини момент інерції робочого органу і передавального механізму.

4. Збудження постійно і номінально
5. Статичний момент постійний і не залежить від інших умов.

Запишемо систему диференціальних рівнянь (СДУ), що описують роботу системи ЕП:

$$\begin{cases} U_{пр} - E_{дв} = L_0 \frac{dI_a}{dt} + I_a R_0; \\ M_{дв} - M_c = J_0 \frac{d\omega}{dt}; \end{cases}$$

- Коефіцієнт ЕДС двигуна

- Коефіцієнт моменту двигуна

$$K_M = C_M \Phi = \frac{M_n}{I_{ял}} = \frac{P_n}{\omega_n I_n}, \frac{H_M}{A}$$

де Φ – магнітний потік машини, C_E , C_M – конструктивні постійні машини

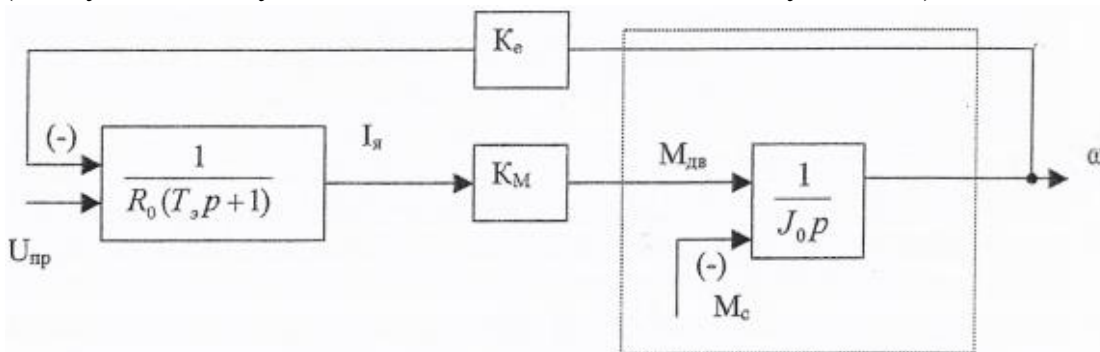
Зручна форма запису ДУ - операторна, для цього замінимо $\frac{d}{dt} \rightarrow P$

$$\begin{cases} U_{np} - K_e \omega = L_0 P I_a + I_a R_0; \\ K_M I_a - M_c = J_0 P \omega. \end{cases}$$

Знайдемо взаємозв'язку між струмом якоря і напругою живлення з першого рівняння і між швидкістю і моментом з другого рівняння

$$\begin{cases} I_a = \frac{U_{np} - K_e \omega}{R_0 (T_e P + 1)}, & \text{де } T_e = \frac{L_0}{R_0} - \text{електромагнітна постійна часу ЕП, с} \\ \omega = \frac{K_M I_a - M_c}{J_0 P}. \end{cases}$$

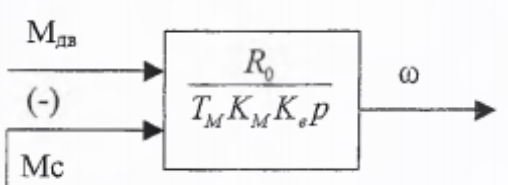
Складемо структуру ЕП постійного струму за допомогою передавальних функцій ПФ (двигун в даному ЕП має незалежне і постійне збудження).



Дана структура повністю відповідає наведеній вище системі рівнянь.

$$T_M = \frac{J_0 R_0}{K_e K_M}, \text{ с.} \quad \text{тримеханічної сталої часу } T_M:$$

На структурній схемі виділимо частину об'єкта (пунктиром), властивості якого визначаються механічною частиною приводу. Виразимо J_0 через T_M , тоді структура прийме наступний вид:



Поведінка цієї ланки визначається тільки постійною часу T_M . Розглянемо зв'язок між $U_{пр}$ і ω (при $M_c = 0$) - це ПФ ЕП по керуючому впливу, ($W_{ЭП}^{УВ}$) і зв'язок між ω і M_c - це ПФ ЕП по впливі, що обурює ($W_{ЭП}^{ВВ}$) при $U_{пр} = 0$.

$$W_{ЭП}^{УВ}(p) = \frac{\omega}{U_{пр}} = \frac{W_{пр}(p)}{1 + W_{пр}(p)W_{ос}(p)} = \frac{\frac{K_M}{J_o R_o p(T_o p + 1)}}{\frac{1 + (K_M K_e)}{J_o R_o p(T_o p + 1)}} = \frac{\frac{1}{K_e}}{T_o T_M p^2 + T_M p + 1},$$

керуючим впливом є $U_{пр}$

$$W_{ЭП}^{ВВ}(p) = -\frac{\Delta\omega}{M_c} = -\frac{\frac{1}{J_o p}}{1 + \frac{\frac{R_o}{K_e K_M}(T_o p + 1)}{\frac{R_o J_o (T_o p + 1)p}} = \frac{\frac{R_o}{K_e K_M}(T_o p + 1)}{T_o T_M p^2 + T_M p + 1},$$

збуджуючим впливом є M_c .

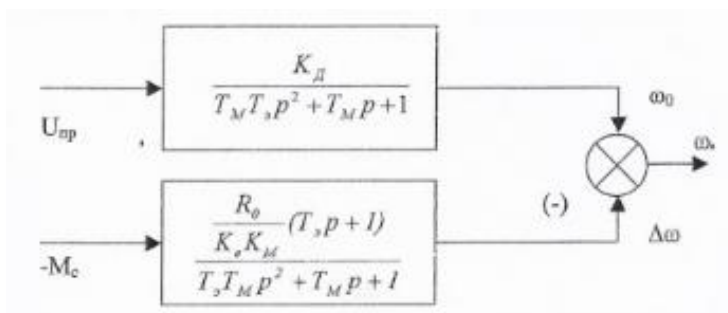
Іноді замість $1 / K_e$ вводиться коефіцієнт K_d - коефіцієнт передачі двигуна по керуючому впливу.

Характер перехідного процесу по управлінню і обуренню визначається корінням характеристичного рівняння: $T_E T_M p^2 + T_M p + 1 = 0$.

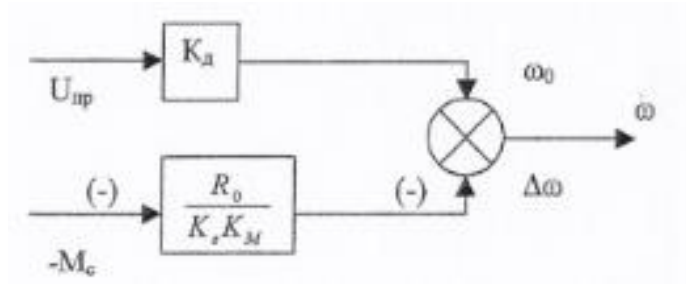
По управлінню: якщо $T_M > 4T_E$, коріння характеристичного рівняння дійсні негативні, характер перехідного процесу-апериодический; якщо $T_M < 4T_E$, - коливальний.

За збудженням - на динаміку процесу впливає чисельник передавальної функції. Таке ланка підвищує динамічність процесу, тобто динамічність процесу по управлінню менше, ніж за збуренням. У загальному випадку статичний момент негативний і його вплив призводить до просідання швидкості.

З урахуванням ПФ з управління і обуренню структура, може бути приведена до наступного вигляду:



Стосовно до статички ($p \rightarrow 0$) структура прийме наступний вигляд:



З останньої структури слідує

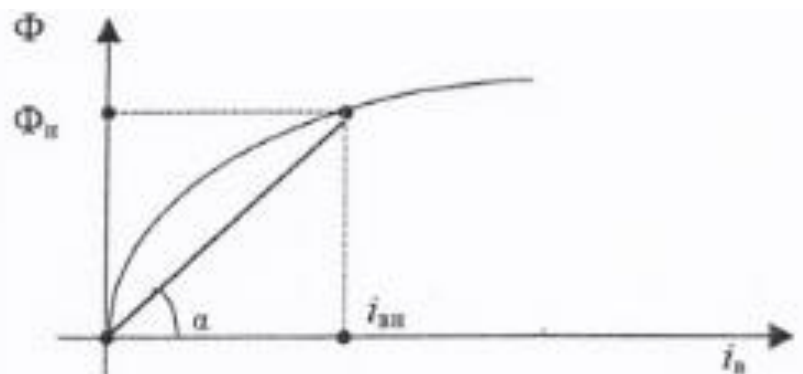
$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = U_{нр} \cdot K_d - \frac{R_0}{K_e K_M} \cdot M_c = \frac{U_{нр}}{K_e} - \frac{M_c \cdot R_0}{K_e K_M} \quad \text{- механічна характеристика ЕП постійного струму}$$

Структурне подання ЕП постійного струму зі змінним магнітним потоком

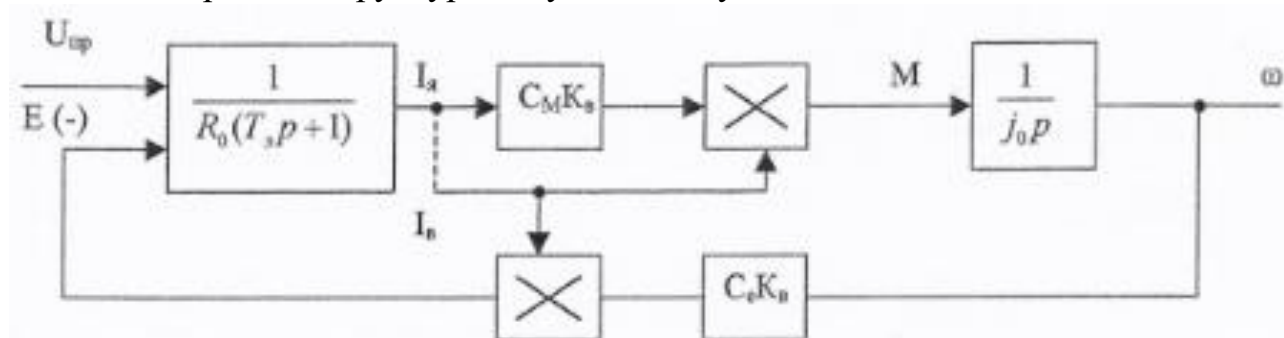
Залежність магнітного потоку від струму збудження називається кривою намагнічування. Відомо $K_e = C_e \Phi$; $K_M = C_M \Phi$.

Лінеаризуючи робочу ділянку, можна записати (робочим ділянкою можна вважати частину кривої намагнічування до насичення):

$$\begin{aligned} \Phi &= K_\Phi i_a; \\ K_\Phi &= C_e K_e i_a; \\ K_M &= C_M K_e i_a; \\ K_\alpha &= \tan \alpha \end{aligned}$$



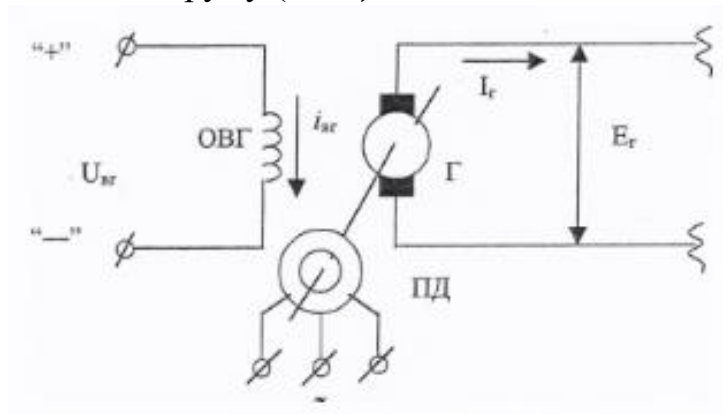
Тоді відома раніше структура набуде вигляду:



Струм збудження I_f в даній схемі є керуючим впливом. Для двигуна з послідовним збудженням дана схема трохи зміниться, в ній струм якоря I_a буде струмом збудження I_f (на малюнку показано штриховою лінією)

Структурний подання приводів з різними видами перетворювачів

Генератор постійного струму (ГПС)



Допущено:

- 1) зневажа петлею Гістерезиса;
- 2) не враховується вплив потоків розсіювання;
- 3) зневажа реакцією якоря і потоками розсіювання від вихрових струмів;
- 4) відсутній насичення, тобто можна прийняти, що залежність потоку від струму - лінійна.

Передавальна функція генератора

$$W_{\Gamma} = \frac{\Delta E_{\Gamma}}{\Delta U_{\text{вг}}} = \frac{K_{\Gamma}}{T_{\text{в}} p + 1}, \quad \text{де}$$

$$K_{\Gamma} \approx \frac{E_{\text{ГН}}}{U_{\text{вГН}}} \approx \frac{E_{\text{ГН}}}{i_{\text{вГН}} \cdot R_{\text{ОВГ}}} - \text{коефіцієнт посилення генератора по напрузі}$$

$$T_{\text{в}} = \sum T_{\text{вг}} \approx \frac{L_{\text{ОВГ}}}{R_{\text{ОВГ}}} - \text{постійна часу збудника (сума всіх постійних часу задіяних обмоток)}.$$

Електромашинний підсилювач поперечного поля (ЕМП)

ЕМУ поперечного поля є двохкаскадним підсилювачем: перший каскад - від заданої обмотки до короткозамкнутого витка; другий - від короткозамкнутого витка до виходу ЕМП.

Передавальна функція ЕМП:

$$W_{\text{ЕМУ}}(p) = \frac{\Delta U_{\text{вг}}}{\Delta U_{\text{г}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{вг}}}{\Delta U_{\text{вг}}} = K_1 K_2 \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

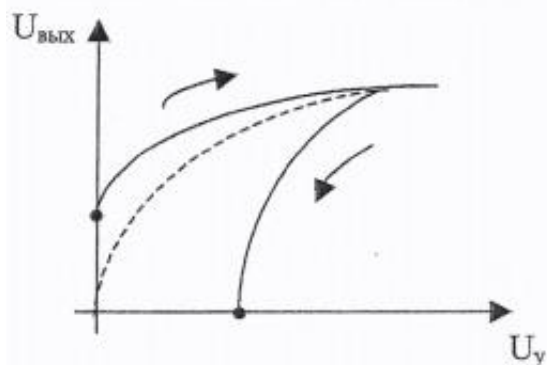
де коефіцієнти підсилення каскадів K_1 і K_2 визначаються:

$$K_1 = \frac{\Delta E_{\text{вг}}}{\Delta U_{\text{г}}}, K_2 = \frac{\Delta U_{\text{вг}}}{\Delta E_{\text{вг}}}$$

$$T_1 = \frac{L_{\text{вг}}}{R_{\text{вг}}}, T_2 = \sum_{i=1}^n \frac{L_{\text{оуі}}}{R_{\text{оуі}}},$$

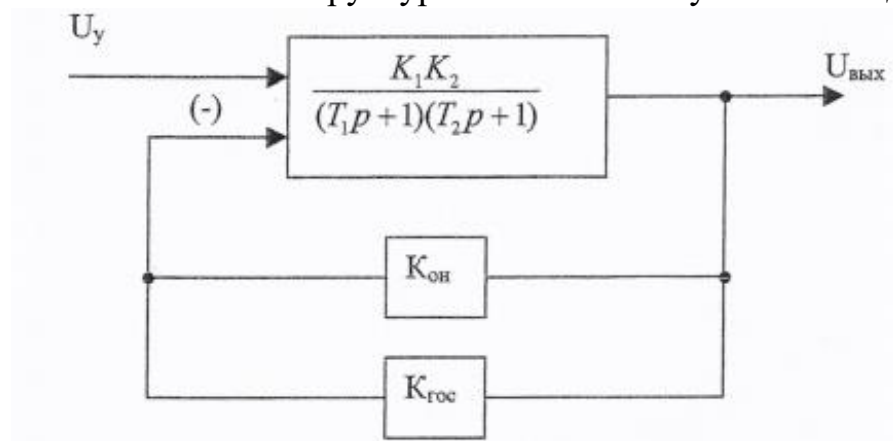
постійна часу T_2 враховує суму всіх постійних часу задіяних обмоток управління.

Вихідна характеристика ЕМП має вигляд:



для ЕМП характерна неоднозначність вихідних характеристик (см. рисунок). Для її компенсації вводять негативний зворотний зв'язок (ООС) по напрузі, але це знижує запас динамічної стійкості системи, тому вводиться додаткова гнучка ООС: RC - ланцюжки, стабілізуючі T_i , які діють тільки в перехідних процесах.

Узагальнена структура ЕМУ має наступний вигляд:



Магнітні підсилювачі (МП)

Магнітні підсилювачі широко поширені як пристрої володіють гарною регулювальною здатністю і надійністю. Недолік: великі габарити і малу швидкодію. Мають цілий ряд рівнозначних обмоток управління, які можуть бути використані для підсумовування сигналів.

Передавальна функція МУ:

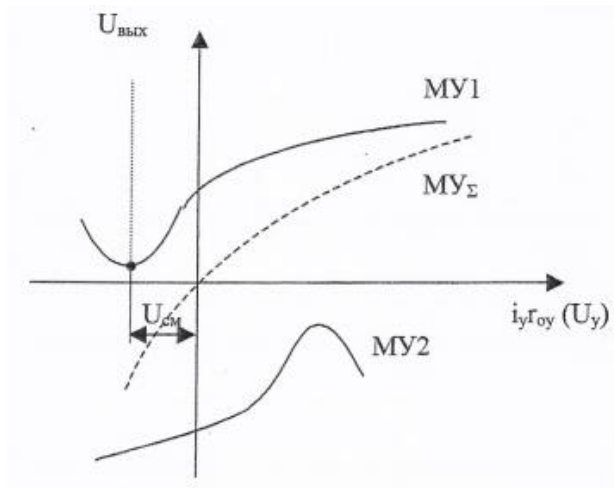
$$W_{МУ}(p) = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_y} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta i_y r_{oy}} = \frac{K_{МУ}}{T_{МУ}p + 1},$$

де $K_{МУ} \approx \frac{U_{вых}}{U_{yn}} \approx \frac{U_{вых}}{r_{oy} i_{yn}}$ - коефіцієнт підсилення МП по напрузі

$T_{МУ} = \sum_{i=1}^n T_{МУi} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{oyi}}{r_{oyi}}$ - постійна часу МУ, що визначається сумою постійних часу всіх задіяних обмоток управління.

Вихідна характеристика магнітного підсилювача МУ1 незручна для експлуатації, тому одну обмотку управління використовують для штучного зміщення вихідної осі в точку екстремуму, підключаючи напругу $U_{см}$. При цьому вихідна характеристика МУ

буде у всьому діапазоні зростати при однозначності струму управління, що зручно в експлуатації.



Розрахунок таких систем зводиться до розрахунку додаткового опору $r_{доб}$, що вводиться в ланцюг обмотки зміщення, для забезпечення $U_{см}$:

$$i_{см} = \frac{U_0}{r_{oy} + r_{дод}} \quad \text{Звідки} \quad r_{дод} = \frac{U_0}{i_{см}} - r_{oy};$$

де U_0 - напруга джерела живлення обмотки зміщення.

Для реверсивних МУ характеристика складається з двох гілок - МУ1 і МУ2 (показано на малюнку), результуюча МУ $_{\Sigma}$ - показана пунктиром.

Тиристорні перетворювачі (ТП).

Передавальна функція ТП:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП}p + 1},$$

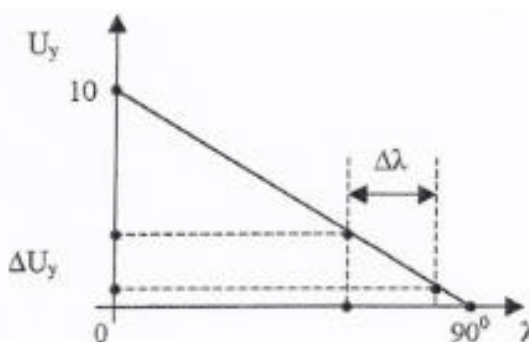
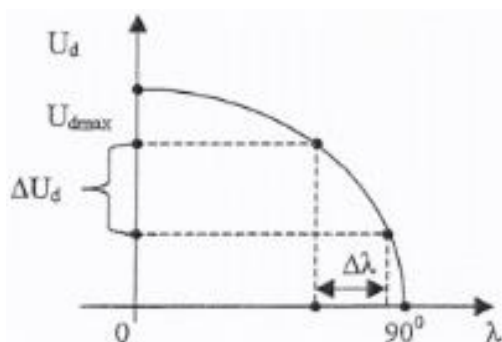
де $K_{ТП} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y} \approx \frac{U_{div}}{U_{yn}}$ коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача,

$T_{ТП} = \frac{1}{2mf_c}$ - постійна часу тиристорного перетворювача; m - пульсність випрямленої напруги (Для 3-х фазної мостової схеми $m = 6$); f_c - частота мережі.

Уточнено $K_{ТП}$ визначається графічно:

будуються залежності $U_d = f(\lambda)$ і $U_y = f(\lambda)$,

де $U_d = U_{dmax} \cdot \cos \lambda$, λ - кут регулювання.



Діапазон ΔU_d вибирається так, щоб в його межах знаходилися найбільш характерні режими роботи ТП; цього діапазону ΔU_d ставиться у відповідність $\Delta \lambda$, а по $\Delta \lambda$ - визначається ΔU_y .

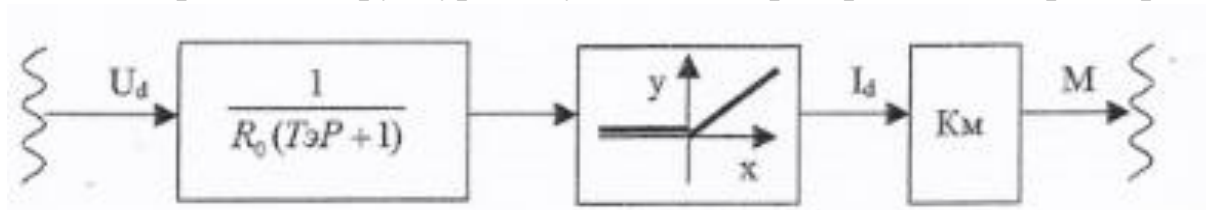
Уточнене значення K_{TP} знаходять:

$$K_{TP} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}.$$

Примітка. При розрахунках замкнутих систем постійна часу T_{TP} часто приймається за некомпенсированое постійну часу внутрішнього контуру:

$$T_{TP} = T_{\mu}.$$

Фрагмент структурного уявлення нереверсивного перетворювача



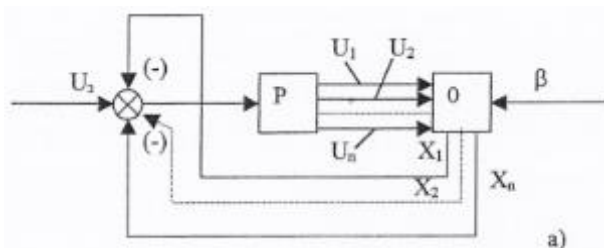
Характерна особливість - наявність в структурі нелінійного елемента типу «вентиль».

Варіанти структури багатоконтурних замкнутих систем

Системи, що містять зворотні зв'язки (ОС), носять назву замкнутих систем. Регулювання може підлягати кілька координат ЕП - струм, швидкість, напруга тощо.

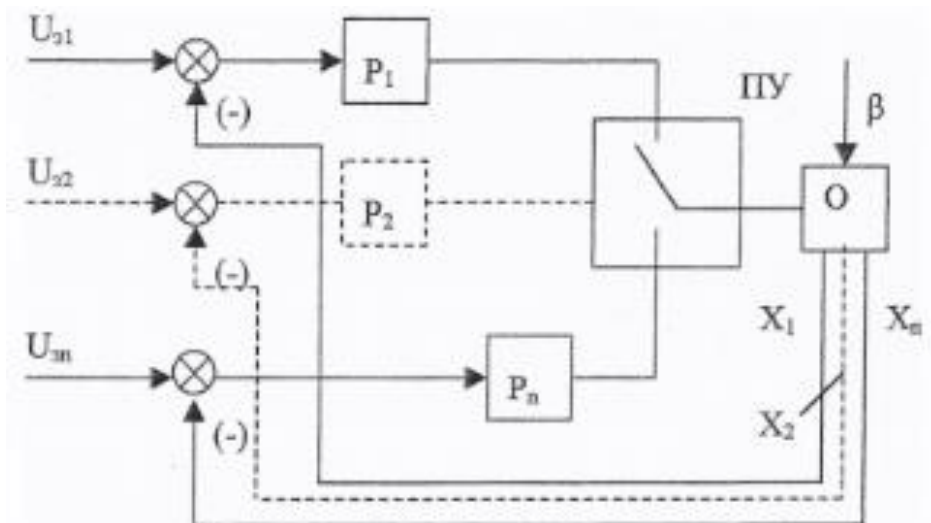
Навіщо багато контурів регулювання? Часто однієї зворотного зв'язку по швидкості може не вистачити, адже швидкість ω виходить по ступені: $U_z \rightarrow U_d \rightarrow I_d \rightarrow M \rightarrow \omega$, тобто. необхідним є регулювання інших проміжних координат за своїми законами.

Розглянемо 3 можливих варіанти замкнутих систем: схема з загальним суматором (схема а), паралельного регулювання (схема б) підлеглого регулювання (схема в).



U_z – задаючий вплив;
 P – регулятор;
 O – об'єкт
 V – збурження.

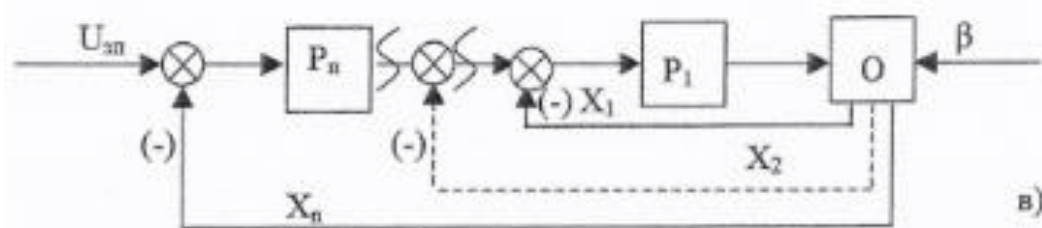
На схемі а) представлена структура із загальним суматором, де сигнали ОС і сигнал завдання підсумовуються на одному підсумовуючому вузлі. Якщо врахувати, що ці сигнали відповідають різними технологічними параметрами, оптимальна налаштування регулятора по кожному параметру неможливе.



Недоліком схеми б (структура паралельного регулювання) є наявність перемикаючого пристрою (ПУ), який послідовно підключає регульовані контури зі своїми регуляторами до об'єкта.

Алгоритм включення ПУ вибирається:

- по великих сигналах неузгодженості;
- за пріоритетом, в установленому раніше порядку.



Найбільш поширений варіант (схема в) - підлегле регулювання координат. Тут кожен внутрішній контур є підлеглим зовнішньому, який формує йому завдання. Регулювання багатоконтурне, регулятори індивідуальні.

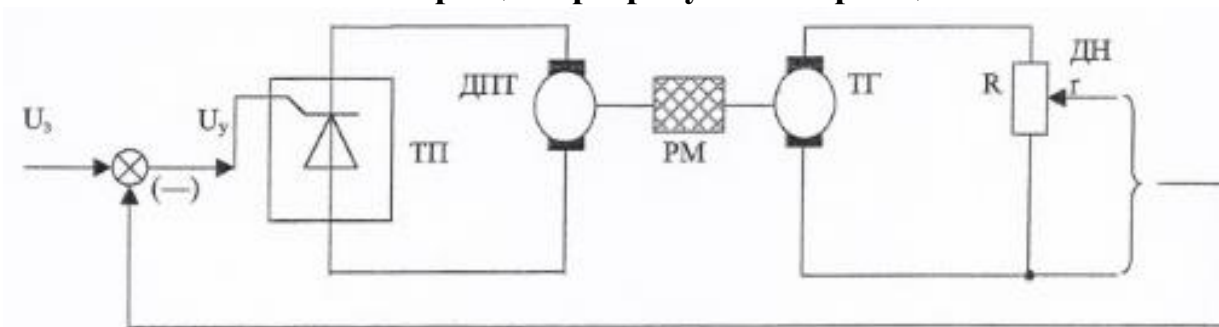
На базі розглянутих структур будуються різні варіанти систем оптимізації в СУЕП.

Розрахунок схеми із загальним суматором

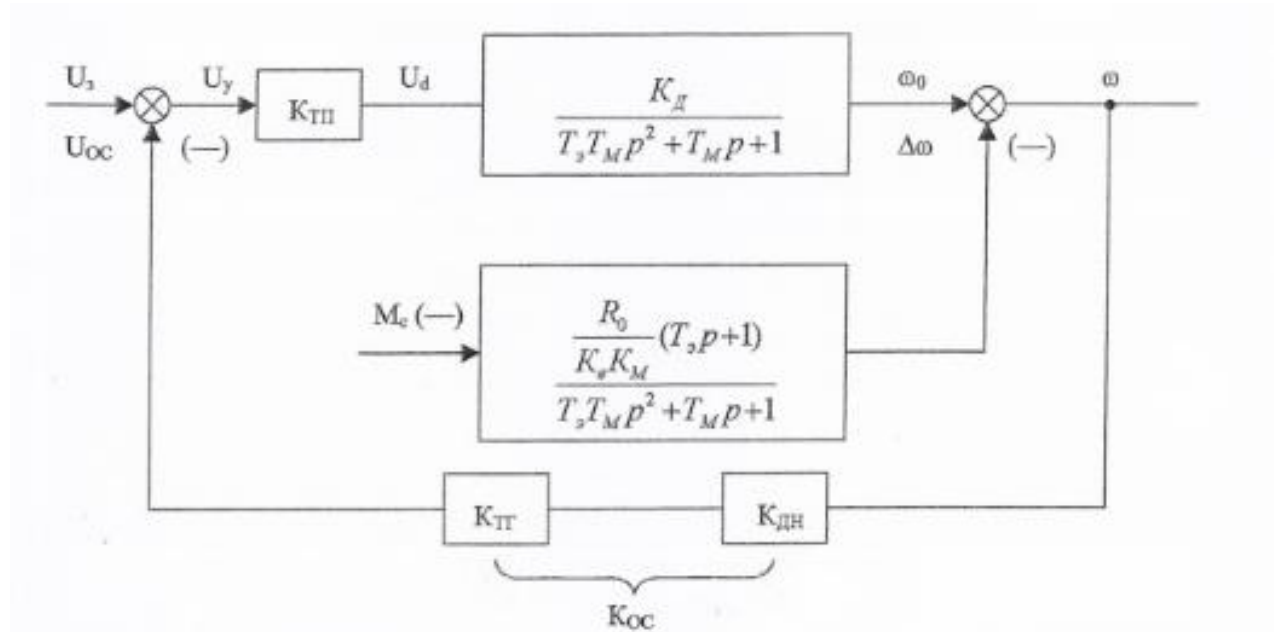
Мета розрахунку - задоволення вимог технології по статичі: $\Delta_z^* < \Delta_{z \text{ зад}}^*$ і динаміці: $\delta_z^* < \delta_{z \text{ зад}}^*$, $t_{pz} < t_{p \text{ зад}}$; Де індекси «з» позначають замкнуту систему, а індекси «зад» - позначає задані за технологією параметри.

Для коливального перехідного процесу можуть бути задані додаткові вимоги (частота коливань, коефіцієнт загасання, кількість коливань за час, регулювання).

Спрощена розрахункова принципова схема

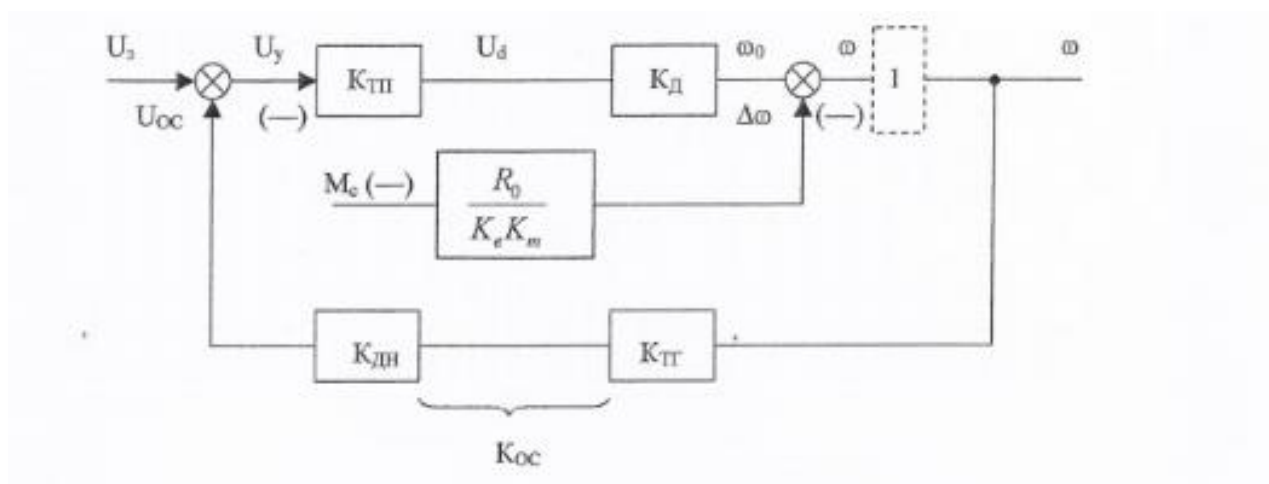


Структурна розрахункова схема приведена до



На структурній схемі $K_{ос} = K_{ТП} K_{ДН}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості, де-
 $K_{ТП} = \frac{\Delta U_{TP}}{\Delta \omega_{TP}} \approx \frac{U_{HT}}{\omega_{HT}}$ - коефіцієнт передачі тахогенератора;

$K_{ДН} = \frac{R-r}{R}$ - коефіцієнт подільника напруги. Статистичний розрахунок системи стабілізації швидкості може бути зведений до наступного. Розрахункова структурна схема, приведена до статиці, має вигляд:



Звернемо дану структуру (без урахування зворотного зв'язку по швидкості). Рівняння статичної характеристики розімкненої системи:

$$\omega = U_3 \cdot K_{ТП} K_{Д} - \frac{M_c K_{Д} R_0}{K_M} = \omega_0 - \Delta \omega_p.$$

Статизм розімкненої системи:

$$\Delta_p = \frac{\Delta \omega_p}{\omega_0} = \frac{M_c K_{Д} R_0}{K_M \omega_0}.$$

Замкнемо схему від'ємної ОС по швидкості. За принципом незалежних змінних ($M_c = 0$), визначаємо коефіцієнт посилення замкнутої системи по керуючому впливу (K_3^{yB}):

$$K_3^{yB} = \frac{\omega_o}{U_3} = \frac{K_{TP} K_D}{1 + K_{TP} K_D K_{OC}} = \frac{K_{TP} K_D}{1 + K_{треб}}, \text{ де } K_{треб} = K_{TP} K_D K_{OC} \quad \text{- необхідний коефіцієнт}$$

посилення системи по контуру регулювання, розірваному у точки підсумовування.

Вважаючи $U_3 = 0$, визначаємо коефіцієнт посилення замкнутої системи по обурювальному впливу (K_3^{BB}):

$$K_3^{BB} = \frac{\Delta \omega_3}{M_c} = \frac{R_o K_D}{K_M} \cdot \frac{1}{1 + K_{TP} K_D K_{OC}} = \frac{R_o K_D}{K_M} \cdot \frac{1}{1 + K_{TP}}.$$

Статизм замкнутої системи:

$$\Delta_3 = \frac{\Delta \omega_3}{\omega_o} = \frac{M_H R_o K_D}{K_M \omega_o} \cdot \frac{1}{1 + K_{TP}} = \Delta_P \frac{1}{1 + K_{TP}}, \quad \text{Звідки } K_{TP} = \frac{\Delta_P}{\Delta_3} - 1.$$

Останній вираз показує, яким повинен бути K_{OC} за швидкістю, який при інших незмінних параметрах дозволить досягти необхідного статизму замкнутої системи.

Якщо враховувати реальний діапазон регулювання швидкості D :

$$D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}$$

то для нижньої характеристики діапазону регулювання статизм в D разів вище, тобто оцінюючи статизм в замкнутій системі:

$$\Delta_3^* = \frac{\Delta_P D}{1 + K_{TP}} = \frac{\Delta_P^*}{1 + K_{TP}} \quad \text{де } \Delta_P^*, \Delta_3^* \quad \text{відповідно, значення статизму розімкнутої і}$$

замкненої систем для нижньої характеристики технологічного діапазону регулювання. Саме значення статизму Δ_3^* - необхідне для досягнення в системі регулювання.

Якщо в результаті розрахунку маємо $K_{дн} > 1$, то досягнення заданого статизму в вихідному варіанті без додаткового посилення неможливо. На вході ТП комутується електронний підсилювач, коефіцієнт підсилення якого визначається з таких міркувань.

Порівнюємо перші частини виразів:

$$K_{TP} = \frac{\Delta_P \cdot D}{\Delta_3^*} - 1 \quad \text{та} \quad K_{TP} = K_{TP} K_D K_{TP} K_{дн}.$$

Для даної системи K_{TP} залишається 1 даних першого. Тоді, у другому вираженні який скуповує вид:

$K_{TP} = K_{ЕУ} K_{TP} K_D K_{TP} K_{дн}$, в залежності від $K_{ЕУ}$ пропорційно знижують $K_{дн}$, для забезпечення умови $K_{TP} = \text{const}$.

Обмеження форсування в замкнутих системах

І в розімкнутих і в замкнутих системах необхідно отримати одну і ту ж ω_0 . Для цього в розімкнутої системі задає вплив $U_{ЗР}$ визначається

$$U_{ЗР} = \frac{\omega_o}{K_{TP} K_D},$$

а в замкненій – $U_{зз}$:

$$U_{зз} = \frac{\omega_0}{K_3^{yb}} = \frac{\omega_0(1 + K_{тп}K_dK_{ос})}{K_{тп}K_d}, \text{ де } K_3^{yb} = \frac{K_{тп}K_d}{1 + K_{тп}K_dK_{ос}} - \text{коефіцієнт}$$

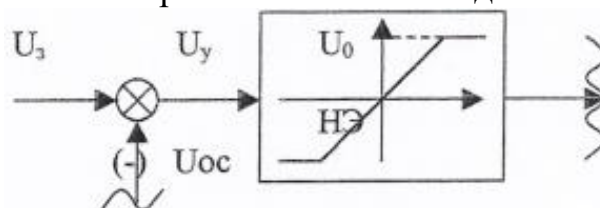
посилення замкнутої системи по керуючому впливу

З наведених вище виразів випливає, що $U_{зз} > U_{зр}$. Відношення цих величин носить назва коефіцієнта форсування K_f :

$$\frac{U_{зз}}{U_{зр}} = K_f \text{ коефіцієнт форсування}$$

Регламентований значення $K_{ф доп}$ лежить в межах 1 ... 2,5.

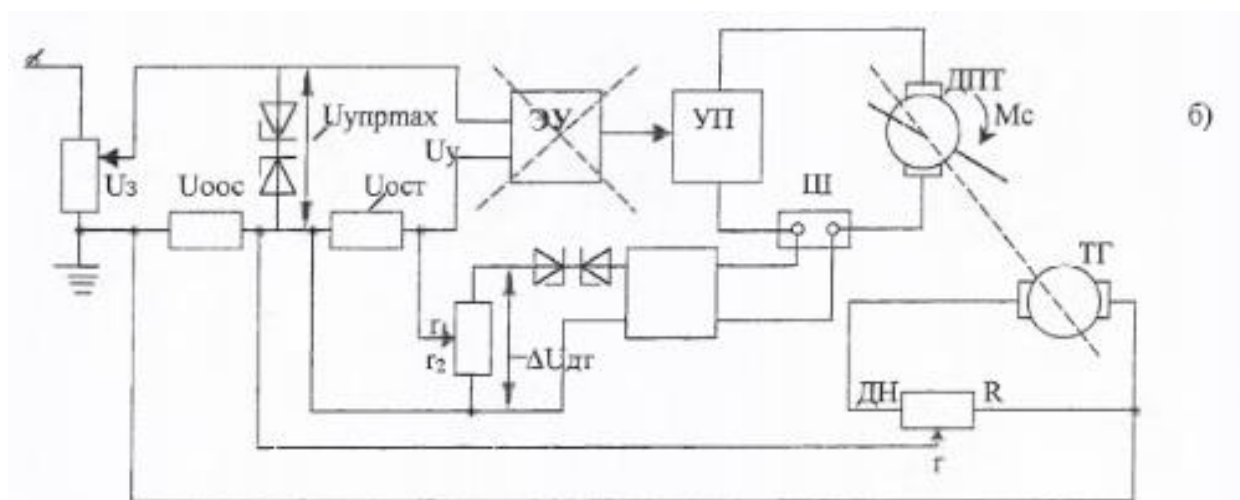
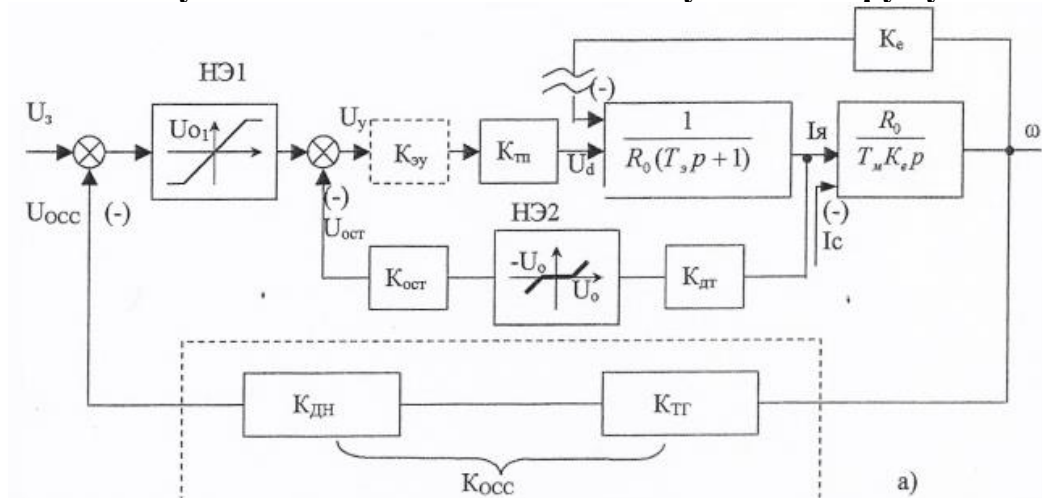
У розрахункових схемах величина K_f досягає десятків або навіть сотень. Для того, щоб врятувати підсумовуючий вузол і СІФУ від перевантаження необхідно вживати заходів. Одним із заходів по обмеження форсувань є включення в схему елемента типу «насичення». Фрагмент схеми наводиться на малюнку:



Нелінійний елемент (НЕ) типу «насичення», який має рівень обмеження

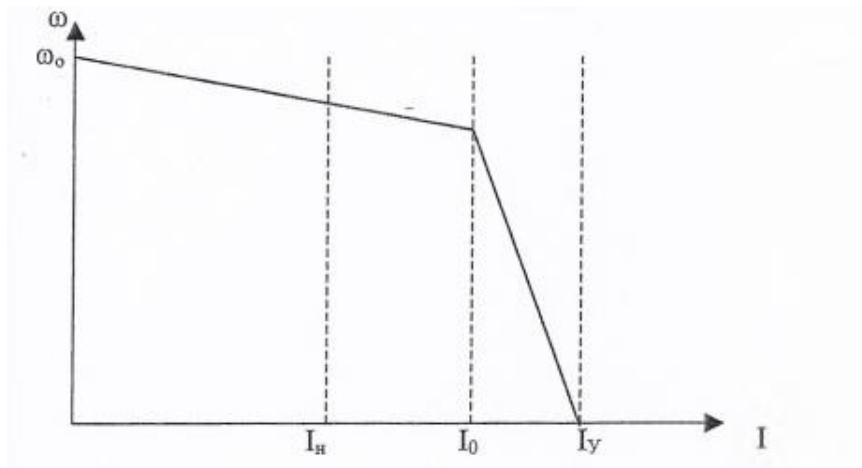
$$U_{упр max} = U_0 \leq U_{зр} \cdot K_{ф доп}$$

Структурна а) і принципова б) схеми системи з загальним суматором, містять негативну ОС по швидкості і негативну ОС по струму з відсіченням



Статичний розрахунок струмового відсічення

Мета розрахунку - сформулювати «екскаваторну» статичну характеристику електроприводу (наводиться на малюнку), що дозволяє вберегти привід при значних токах в системі. При значеннях струму менших струму відсічення I_0 - статична характеристика будується без урахування дії ОСТ. При токах $I_0 > I > I_y$ (де I_y - струм упору) вступає в дію ОСТ, формується вниз падаюча частина статичної характеристики, при цьому швидкість досягає нуля при $I = I_y$



Порядок статичного розрахунку

1. Вибір датчика струму. Визначаємо коефіцієнт датчика струму, ставленням апаратного вихідної напруги датчика до максимального току в систему (I_y):

$$K_{ДТ} = \frac{U_A}{I_y}, \quad \text{попередньо обравши значення } I_y \text{ і } I_0.$$

Струм упору I_y вибираємо в межах $(1,8 \div 2,5)I_H$; ток відсічення I_0 - в межах $(1,2 \div 1,6)I_H$.

2. Уставка нечутливості нелінійного елемента типу «зона нечутливості», включеного на виході датчика струму

$$U_0 = I_0 \cdot K_{ДТ}.$$

3. Напруга перетворювача в режимі стопоріння приводу з максимальної швидкості (залишкову напругу перетворювача в режимі упору)

$$U_{ПТ ОСТ} = R_0 \cdot I_y.$$

4. Чому має відповідати напруга на вході ЕУ (якщо він є) або на вході ТП

$$U_{уст} = \frac{U_{ПТОСТ}}{K_{ПТ} K_{ЭУ}}.$$

5. Необхідний сигнал ОС по струму при упорі з максимальної швидкості

$$U_{ост} = U_{успр} - U_{уст}.$$

6. Приріст виходу датчика струму в період дії струмового відсічення

$$\Delta U_{\text{ДТ}} = (I_y - I_0) \cdot K_{\text{ДТ}}.$$

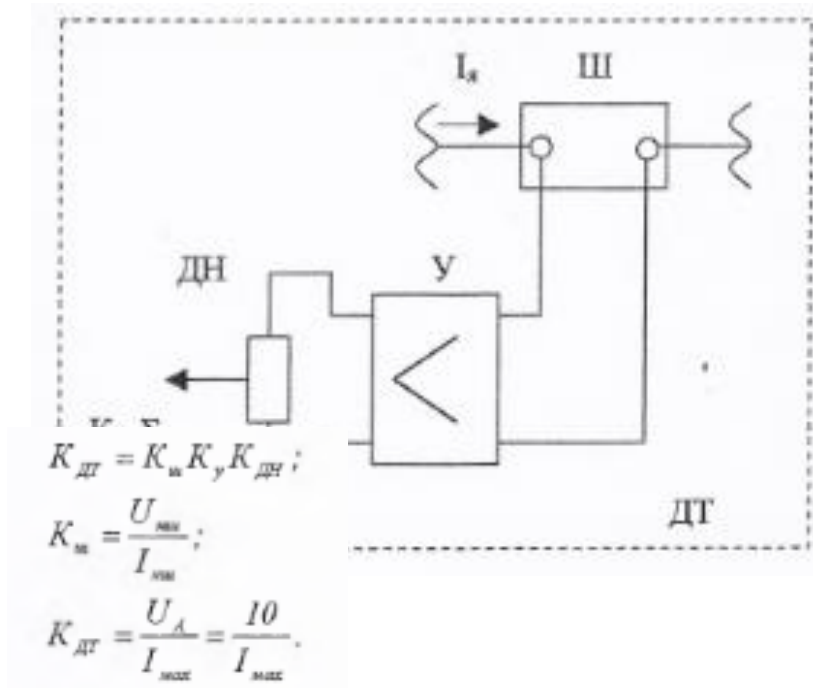
7. Необхідний коефіцієнт зворотного зв'язку по струму $K_{\text{ост}}$ реалізований потенціометричним дільником включеним на виході нелінійного елемента

$$K_{\text{ост}} = \frac{U_{\text{ост}}}{\Delta U_{\text{дн}}} = \frac{r_2}{r_1 + r_2}.$$

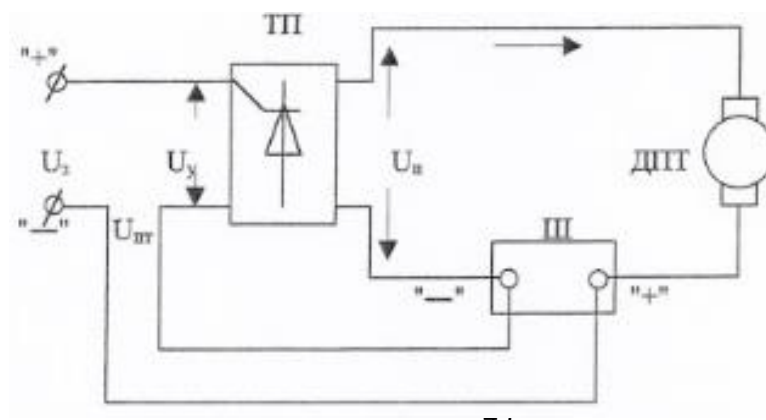
Повинно бути отримано значення $K_{\text{ост}} < 1,0$, в іншому випадку змінюють у більшу сторону $K_{\text{ДТ}}$ або розширюють діапазон між I_0 і I_y і повторюють розрахунок, або замість потенціометричного подільника на виході нелінійного елемента ставиться підсилювач з коефіцієнтом посилення $K_{\text{ост}}$

Стабілізація швидкості обертання з використанням позитивного зворотного зв'язку (ПОС) по току

Реалізація датчика струму (ДТ):



Розрахункова схема:



Складемо рівняння електричного балансу

$$U_3 K_{TP} = (U_3 + U_{TP}) K_{TP} = U_{TP} = IR_0 + K_e \omega, \quad \text{де } U_{TP} - \text{напруга ПОС по струму; } U_{TP} -$$

вихідна напруга тиристорного перетворювача (ТП); $E_{дв} = K_e \omega$ -проти-ЕРС двигуна.

$$U_{TP} = IK_{дт}; R_0 = R_{TP} + R_{Яг} + R_{ш}, \quad \text{де } R_{TP}, R_{Яг}, R_{ш} - \text{відповідно, активні опори}$$

перетворювача, якоря двигуна і шунта, вирішимо рівняння щодо ω :

$$\omega = \frac{U_3 K_{TP}}{K_e} - \frac{IR_0}{K_e} \left(1 - \frac{K_{TP} K_{дт}}{R_0}\right).$$

Умова статичної та динамічної стійкості системи має вигляд:

$$1 - \frac{K_{TP} K_{дт}}{R_0} > 0, \quad \text{звідки} \quad \frac{K_{TP} K_{дт}}{R_0} < 1; K_{дт} < \frac{R_0}{K_{TP}}.$$

Рівняння статичної характеристики показує, що в даній системі можна отримати будь-яку жорсткість характеристики зміною коефіцієнта ОС по струму.

Стабілізація швидкості з використанням негативноюзворотного зв'язку (ООС) по напрузі.

З використанням ООС по напрузі, ЕД поводить ся як окремий елемент. Стабілізуючи напругу перетворювача, ми добиваємося зниження впливів пульсацій випрямленої напруги на жорсткість механічної характеристики, яка буде прагнути до жорсткості природної характеристики, але ніколи її не досягне, зважаючи на наявність додаткових елементів схеми (Тр, Пртощо)

Висновок: позитивна ОС по струму зазвичай використовується як додаткова до негативної ОС по напрузі або по швидкості. Завжди необхідно проводити дослідження на стійкість таких систем

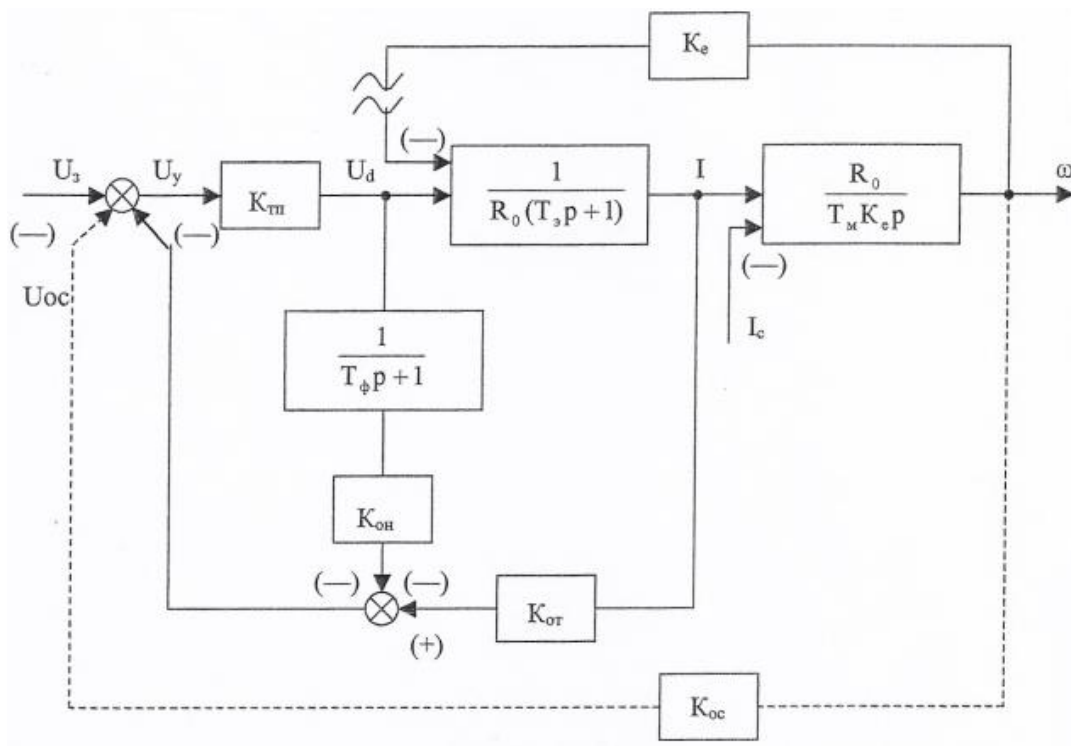
Стабілізація швидкості обертання без використання тахометричної ОС

У тих випадках, коли немає можливості безпосередньо вимірювати швидкість, тобто отримати сигнал напруги, пропорційний швидкості обертання, стабілізацію швидкості обертання здійснюють комбінацією ОС по напрузі і струму. Ця можливість впливає з рівняння

$$\omega = \frac{U}{K_e} - \frac{IR_0}{K_e}, \quad \text{тобто сигнал пропорційний}$$

швидкості можна отримати як різниця сигналів пропорційних напрузі і току: $U_\omega \approx U_u - U_I$ (внутрішнім падінням напруги в перетворювачі нехтуємо).

Структурна розрахункова схема має такий вигляд:



Для розрахунку таких систем застосовують наступну програму.

1. Проводиться розрахунок еквівалентної ОС по швидкості з визначенням K_{oc} (без вибору тахогенератора).
2. Визначається напруга перетворювача при холостому ході двигуна:

$$U_{прхх} = \frac{\omega_0}{K_\partial}.$$

Тут же знаходимо напруга, що розвивається ООС по швидкості при холостому ході

$$U_{осхх} = \omega_0 \cdot K_{ос}.$$

3. Еквівалентну дію різниці сигналів зворотних зв'язків по напрузі і струму сигналу зворотного зв'язку за швидкістю виражається так:

$$\omega K_{ос} = U K_{он} - I K_{от}.$$

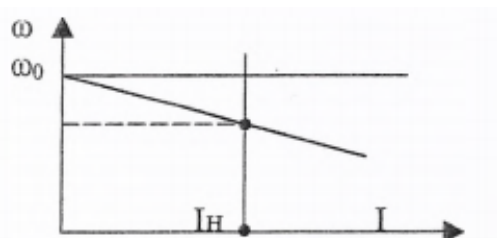
Для умови холостого ходу останній вираз може бути записано:

$$\omega_0 K_{ос} = U_{прхх} K_{он},$$

звідси

$$K_{он} = \frac{K_{ос} \cdot \omega_0}{U_{прхх}}.$$

Визначається напруга ОС по швидкості для верхньої і нижньої характеристик при номінальному статичному навантаженні:



- для верхньої характеристики

$$U_{oc} = \omega_0(1 - \Delta_3)K_{oc},$$

- для нижньої характеристики

$$U^*_{oc} = \frac{\omega_0(1 - \Delta^*_3)K_{oc}}{D}.$$

5. Визначається зміна сигналу ОС по швидкості при зростанні навантаження від 0 до номінального:

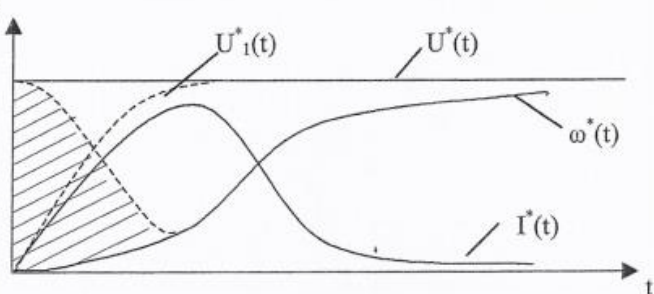
$$\Delta U_{oc} = U_{oc\text{ном}} - U_{oc},$$

6. Необхідний коефіцієнт ОС по струму:

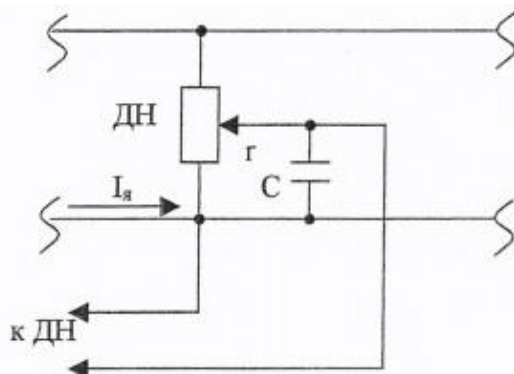
$$K_{oc} = \frac{\Delta U_{oc}}{I_H},$$

де I_H - номінальний струм

Фільтр в ланцюзі ОС по напрузі необхідний для узгодження динамічних процесів за швидкістю і різниці між напругою і струмом. Помилка неузгодженості показана заштрихованим ділянкою на малюнку. Включення в схему фільтра забезпечує зміну напруги не стрибком, а з інерційністю T_e , тобто з інерційністю струму (сигнал $U_1^*(t)$ на схемі). При цьому виключається помилка неузгодженості і різницевий сигнал між $U_1^*(t)$ і $I^*(t)$ повторює сиги U^*, ω^*, I^*



Фрагмент схеми включення R-C фільтра в силовий ланцюг:



На схемі: $T_f = rC = T_e$ - постійна часу фільтра; ДН - дільник напруги.

Дослідження динаміки замкнутих систем

Мета: визначення факту динамічної стійкості і оцінка стійкості, синтез коригувальних пристроїв.

Алгебраїчні методи дослідження стійкості: кореневий, Рауса-Гурвіца, Вишнеградський; частотні критерії: Найквіста, Михайлова, метод ВЧХ, метод ЛА.ЧХ і ін.; графічні і графо-аналітичні методи Башарина, Суворова та ін. детально досліджені в курсі «Теорія автоматичного управління». Коротко згадаємо необхідні нам методи.

Методи дослідження стійкості.

1. Алгебраїчні критерії стійкості

А) кореневої-коріння характеристичного рівняння повинні бути не уявними і мати негативну реальну частину.

В) Рауса-Гурвіца - при позитивному коефіцієнті характеристичного рівняння замкнутої системи, головний визначник і його діагональні мінори повинні бути позитивними: для характеристичного рівняння 3-го порядку

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0,$$

головний визначник

$$\Delta_{21} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

В) запас стійкості можна визначити за критерієм Вишнеградський (використовується тільки для аналізу характеристичних рівнянь 3-го порядку). За коефіцієнтами характеристичного рівняння визначаються коефіцієнти Вишнеградського (М і N) і по діаграмі Вишнеградського визначається характер перехідного процесу, і запас стійкості / 2 /.

2. Частотні критерії стійкості.

А) Найквіста- дозволяє судити про стійкість замкнутої системи по амплітудно-фазовій характеристиці (АФХ) розімкнутої системи. На комплексній площині будується АФХ розімкнутої системи. Якщо АФХ розімкнутої системи не охоплює точку з координатами (-1;j0) на комплексній площині, то замкнута система стійка.

Б) Критерій Михайлова- в характеристичному рівнянні замкнутої системи замінюють p на $j\omega$ на комплексній площині $p(\omega)$ і $j q(\omega)$ будується годограф Михайлова, який, починаючись на позитивній частині дійсної осі, послідовно проходить N- квадрантів, при цьому ω від 0 до ∞ , де N-порядок характеристичного рівняння, то схема стійка.

В) Метод реальних частотних характеристик.

Г) Метод ЛАЧХ.

3. Графоаналітичні методи Башарина, Суворова.

4. Методи математичного моделювання.

Метод аналізу динаміки нелінійних систем

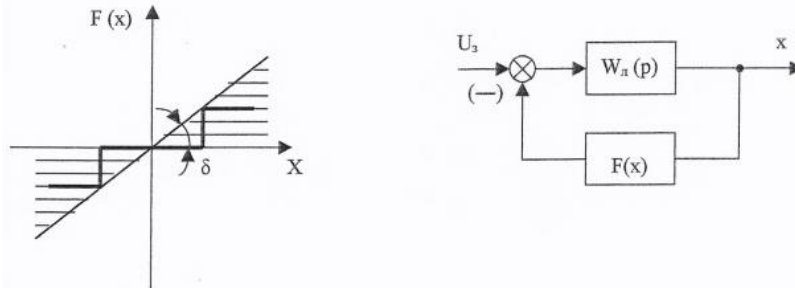
Існує кілька методів:

1. Метод фазової площини для дослідження нелінійних систем до другого порядку.
2. Критерій абсолютної стійкості Попова.
3. Метод гармонійної лінеаризації.
4. Метод моделювання.

Критерій абсолютної стійкості В.М.Попова

Під абсолютною стійкістю розуміють стійкість САУ при будь-яких початкових відхиленнях для будь-якої форми нелінійної характеристики.

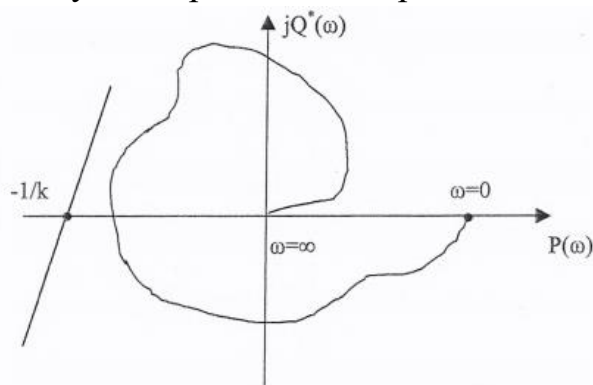
Нехай задана лінійна частина $W_{\text{л}}$ і нелінійна однозначна функція $F(x)$, форма якої відома



Під абсолютною стійкістю розуміємо стійкість САУ при будь-яких початкових відхиленнях для будь-якої форми нелінійної характеристики. Відому характеристику $F(x)$ укладаємо в сектор (заштрихований) під обмежуючим кутом δ . З виразу $\delta = \arctg k$ знайдемо k . За передавальної функції лінійної частини виділимо речову частотну характеристику (ВЧХ) $P(\omega)$ і модифіковану

$$jQ^*(\omega) = \omega \cdot jQ(\omega)$$

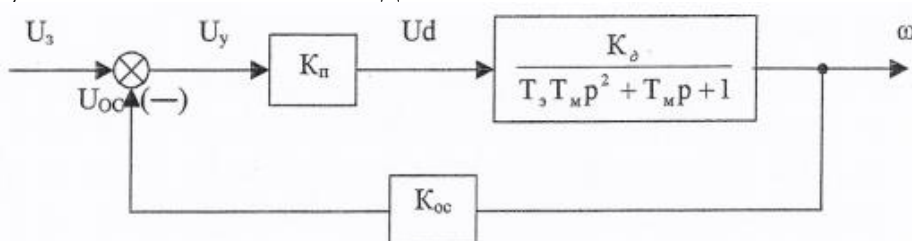
У площині $[jQ^*(\omega); P(\omega)]$ будується модифікована характеристика, при зміні ω від 0 до нескінченності; і через точку $-1/k$ проводиться пряма Попова.



Критерій абсолютної стійкості Попова формується таким чином: система абсолютно стійка, якщо через точку $-1/k$ можна провести пряму Попова так, щоб годограф модифікованої характеристики був справа.

Дослідження динаміки систем з загальним суматором. Дослідження системи з ОС по швидкості

Розрахункова схема має вигляд



Для розімкнутої системи передавальна функція має вигляд

$$W_{роз} = \frac{\omega}{U_3} = \frac{K_n K_\delta}{T_3 T_m p^2 + T_m p + 1}.$$

Характер перехідного процесу визначається коріннями характеристичного рівняння

$$T_3 T_m p^2 + T_m p + 1 = 0.$$

- при $T_m > 4T_3$ - коріння від'ємні дійсні, перехідний процес аперіодичний;
- при $T_m < 4T_3$ - коріння комплексні, перехідний процес - коливальний.

Уявимо характеристичне рівняння при коливальному процесі в наступному вигляді:

$$\text{де } \frac{1}{\Omega_0^2} p^2 + \frac{2\varepsilon}{\Omega_0} p + 1 = 0,$$

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{T_3 T_m}}, \varepsilon = \frac{T_m}{2};$$

ε - коефіцієнт загасання перехідного процесу;

Ω_0 - частота очікуваних коливань.

Замкнемо систему, тоді

$$W_3 = \frac{\omega}{U_3} = \frac{K_n K_\delta}{T_3 T_m p^2 + T_m p + 1 + K_n K_\delta K_{oc}} = \frac{\frac{K_n K_\delta}{1 + K_n K_\delta K_{oc}}}{\frac{T_3 T_m}{1 + K_n K_\delta K_{oc}} p^2 + \frac{T_m}{1 + K_n K_\delta K_{oc}} p + 1}.$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи:

$$\frac{T_3 T_m}{1 + K_n K_\delta K_{oc}} p^2 + \frac{T_m}{1 + K_n K_\delta K_{oc}} p + 1 = 0$$

Порівняємо його з характеристичним рівнянням розімкнутої системи:

$$\frac{1}{\Omega_{ор}^2} = T_3 T_m, \frac{2\varepsilon_{ор}}{\Omega_{ор}} = T_m;$$

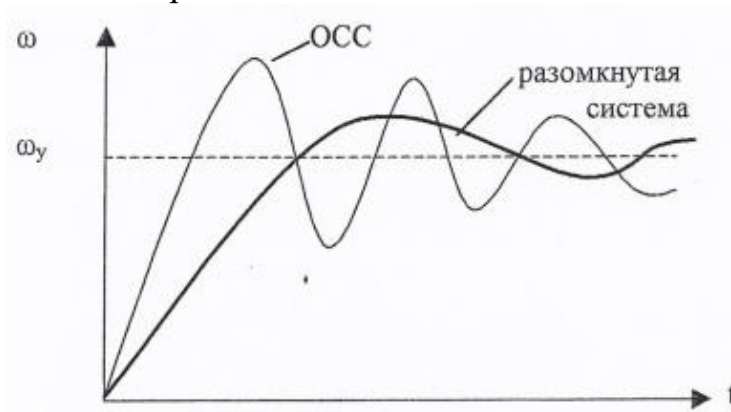
$$\frac{1}{\Omega_{оз}^2} = \frac{T_3 T_m}{1 + K_n K_\delta K_{oc}}, \frac{2\varepsilon}{\Omega_{оз}} = \frac{T_m}{1 + K_n K_\delta K_{oc}}.$$

Звідси слідує що

$$\Omega_{ор} < \Omega_{оз}, \varepsilon_{ор} > \varepsilon.$$

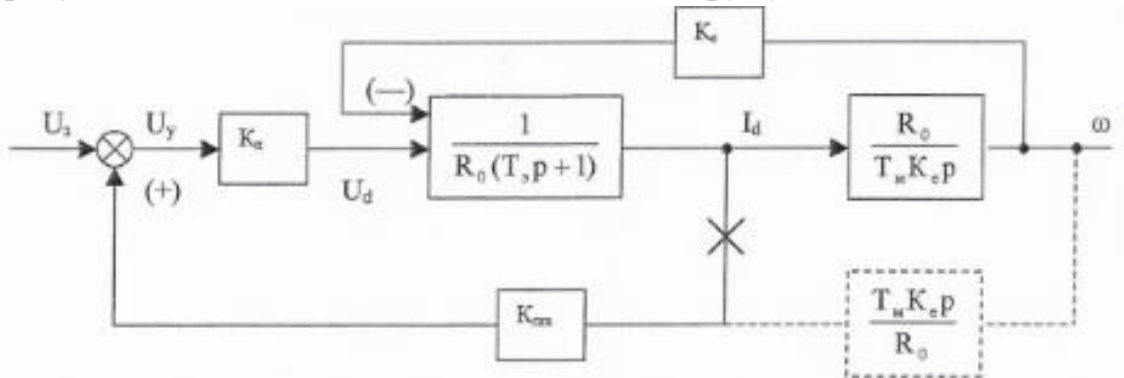
Висновок. У схемі з ООС по швидкості погіршується динаміка, тобто такі схеми потребують ретельному аналізу. Підвищення стійкості досягається введенням гнучких зворотних зв'язків або введенням коригувальних пристроїв.

Графіки динаміки в порівнянні



Динаміка системи з ОС по струму

Розрахункова схема має вигляд (для ПОС по струму):



Здійснимо перенесення ОС по струму (через ланка) в точку "ω".

Передавальна функція замкнутої системи

$$W_s(p) = \frac{\omega}{U_2} = \frac{K_\epsilon K_\phi}{T_3 T_3 p^2 + T_3 p + 1 - \frac{T_3 K_\epsilon K_{mn}}{R_0} p} = \frac{K_\epsilon K_\phi}{T_3 T_3 p^2 + T_3 (1 - \frac{K_\epsilon K_{mn}}{R_0}) p + 1},$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи:

$$T_3 T_3 p^2 + T_3 (1 - \frac{K_\epsilon K_{mn}}{R_0}) p + 1 = 0,$$

тобто маємо

$$\frac{1}{\Omega_{\text{ст}}^2} = T_3 T_3, \quad \frac{2\epsilon_2}{\Omega_{\text{ст}}} = T_3 (1 - \frac{K_\epsilon K_{mn}}{R_0}).$$

У порівнянні з розімкненою системою: $\Omega_{\text{ст}} = \Omega_{\text{от}}, \epsilon_f > \epsilon_1.$

Висновок. В системі з ПОС по току динаміка системи краще, ніж з ООС по швидкості, але гірше, ніж в розімкнутій системі. Умова динамічної стійкості:

$$1 - \frac{K_\epsilon K_{mn}}{R_0} > 0.$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи з ООС по току:

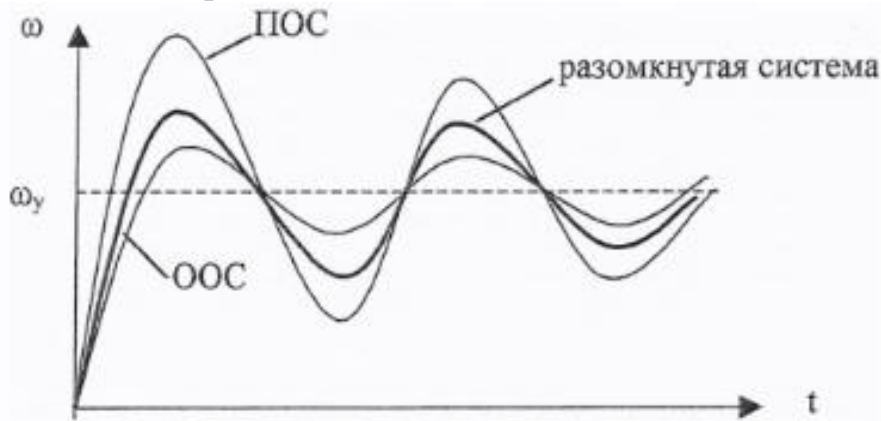
$$T_3 T_3 p^2 + T_3 (1 + \frac{K_\epsilon K_{mn}}{R_0}) p + 1 = 0.$$

Звідки $\Omega_{\omega} = \Omega_{\sigma}, \varepsilon_p < \varepsilon_s$.

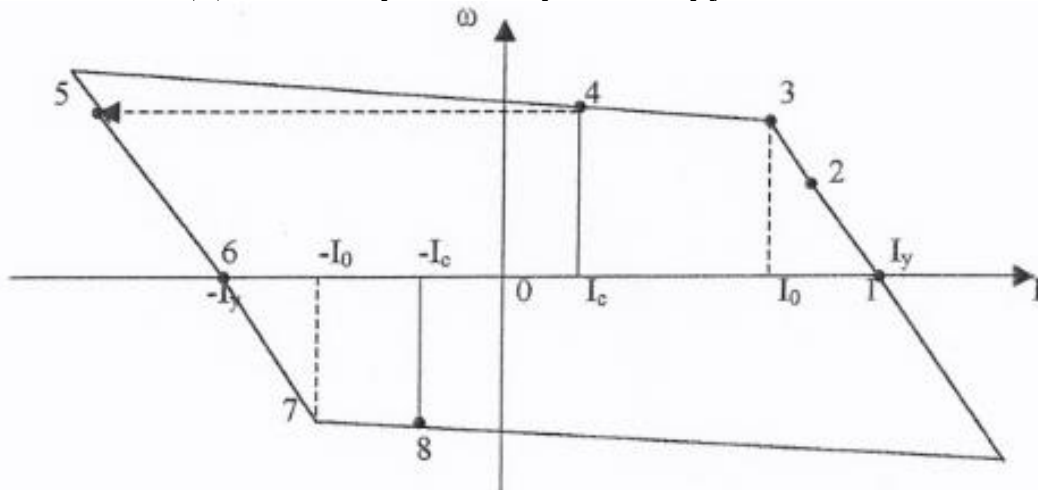
Висновок. Динаміка в системі з ООС по току краще, ніж в розімкнутій системі.

При аналізі динаміки систем з ООС по швидкості і струму, дією ООС по току нехтують, т. к. свідомо в цьому випадку потрібно брати найгірший варіант роботи системи, авведення ООС по току покращує і динаміку, і стійкість системи.

Графіки динаміки в порівнянні:



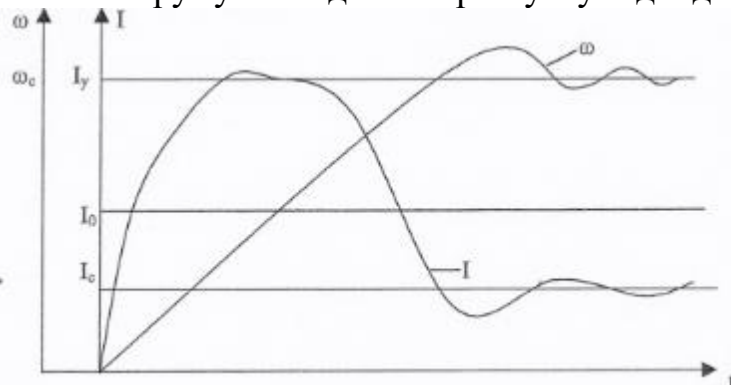
Динамічні режими дрови з струмового відсіченням



Можливі режими роботи:

- 1) неповне стопоріння під навантаженням (4 → 3 → 2);
- 2) повне стопоріння під навантаженням (4 → 3 → 2 → 1);
- 3) пуск під відсічення (0 → 1 → 2 → 3 → 4);
- 4) реверс під відсічення (4 → 5 → 6 → 7 → 8).

При пуску під відсічення до струму відсічення йде інтенсивне збільшення струму, від струму відсічення до струму упору інтенсивність зменшується, при досягненні струму упору система миттєво зреагувати не встигає і йде невелике перерегулювання. Перехідні характеристики струму і швидкості при пуску під відсічення:



Динаміка системи із загальним суматором

Перехідний процес будується таким чином. Складається передавальна функція замкнутої системи (без урахування дії ООС по току) і приводиться до вигляду:

$$W_z(p) = \frac{\omega_0}{U_s} = \frac{K}{\lambda p^2 + \beta p + 1},$$

потім визначаємо частоту очікуваних коливань і коефіцієнт загасання:

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{\lambda}}.$$

Графік перехідного процесу швидкості будується за такою залежністю (в відносних одиницях):

$$\bar{X} = 1 - \frac{1}{\sin \gamma} e^{-\varepsilon \omega_0 t} \sin(\sqrt{1 - \varepsilon^2} \omega_0 t + \gamma),$$

$$\text{де } \gamma = \arcsin \sqrt{1 - \varepsilon^2}.$$

Час t змінюють від 0 до (3 ... 4) T_m

Загальні принципи оптимізації.

Розрахунок систем підпорядкованого регулювання координат

Загальні принципи оптимізації можуть бути зведені до наступних:

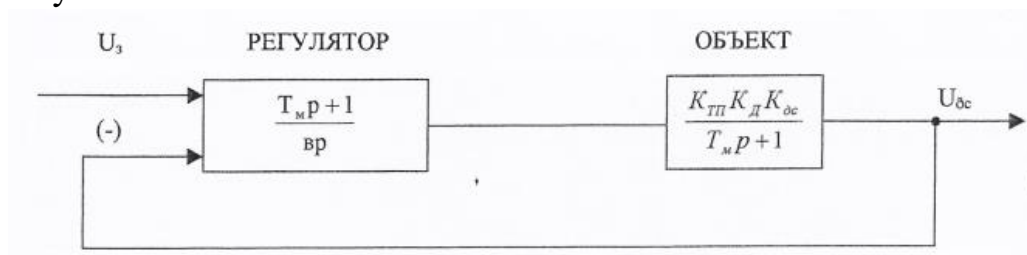
- 1) $\Delta_s \leq \Delta_{s, \text{дон}}^* \rightarrow 0$;
- 2) $t_{\text{рег}} \leq t_{\text{рег, дон}} \rightarrow 0$;
- 3) $\delta \leq \delta_{\text{дон}} \rightarrow 0$.

В ідеалі формулювання цих принципів може прагнути до наступного: повідомити системі властивості безінерційної ланки $W_z(p) \rightarrow k$.

При цьому необхідно мати математичний опис і можливість технічної реалізації зазначених вимог. Насправді властивості безінерційної ланки практично системі повідомити неможливо, тому зупинимося на цілком певному рівні швидкодії, що досягається для зазначеної системи. Цей необхідний рівень швидкодії характеризується некомпенсованою постійною часу (або сумою некомпенсованих постійних часу) - T_{Σ} .

У загальному випадку маємо об'єкт: $W_0 = \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{Д}} K_{\text{ДС}}}{T_m p + 1}$.

великої постійної часу T_m необхідна структура регулятора, що містить $T_m p + 1$ в чисельнику:



Однак ідеальну диференціюючу ланку $T_m p$ неможливо реалізувати.

Розділивши $T_{\text{мр}} + 1$ на ϵp , де p - оператор Лапласа, ϵ - коефіцієнт, отримуємо прекраснореалізований регулятор, що містить паралельно включений інтегратор і пропорційну ланку.

За значення $T_{\text{м}}$ приймається некомпенсована постійна часу внутрішнього контуру іноді беруть

$T_{\text{м}} = \frac{1}{2mf_{\text{с}}} = T_{\text{тп}}$ - постійна часу тиристорного перетворювача (якщо використовується тиристорний електропривод).

Більш точний розрахунок $T_{\text{м}}$ наводиться в довідниках з проектування електроприводів. Значення $T_{\text{м}}$ знаходиться в межах від 4 (для малоінерційних перетворювачів) до 20мс (для високоінерційних перетворювачів).

У розрахунках приймаємо $T_{\text{м}} = 0,01$ с (орієнтування на перетворювач середнього швидкодії).

Знайдемо передавальну функцію розглянутої вище замкнутої структури $W_3(p)$:

$$W_3(p) = \frac{U_{\text{дс}}}{U_2} = \frac{K_{\text{тп}} K_{\text{дс}} K_{\text{д}} / \epsilon p}{1 + \frac{K_{\text{тп}} K_{\text{дс}} K_{\text{д}}}{\epsilon p}} = \frac{1}{\frac{\epsilon}{K_{\text{тп}} K_{\text{дс}} K_{\text{д}}} p + 1},$$

де $\frac{\epsilon}{K_{\text{тп}} K_{\text{дс}} K_{\text{д}}} = T_2$ - постійна часу замкнутого контуру,

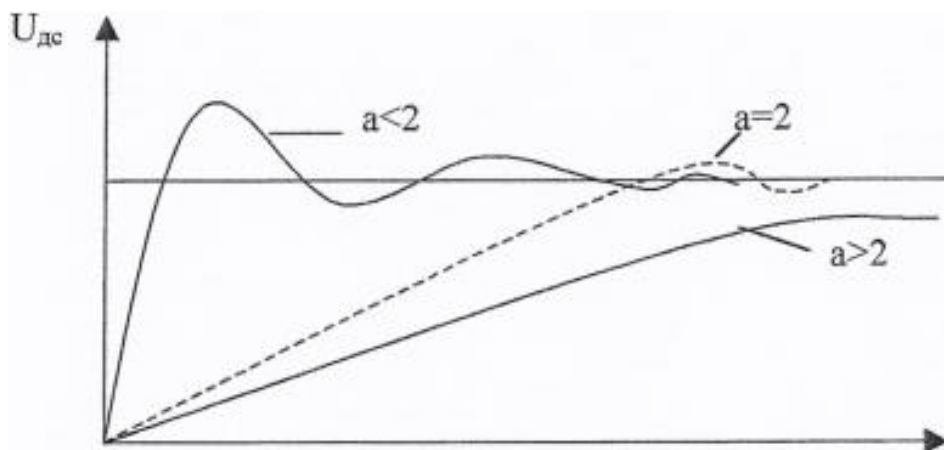
Якщо $\epsilon \rightarrow 0$, то $W_3(p) \rightarrow 1$, чого ми і прагнемо.

Позначимо $\epsilon = T_{\text{м}} a$,

де a - коефіцієнт, $T_{\text{м}}$ - некомпенсована постійна часу

Виявляється, що від значення a залежать параметри одержуваного перехідного процесу: так, оптимальний перехідний процес за часом регулювання і

перерегулювання буде при значенні $a=2$ (при цьому $\epsilon = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,7$)



Якщо в динаміці необхідно забезпечити тільки високу швидкість або система не повинна мати перерегулювання, вибираємо $a < 2$ або $a > 2$, відповідно, але найчастіше необхідно оптимізувати обидва ці параметра, тому приймають $a=2$.

Модульний (технічний) оптимум (МО) настройки регулятора.

Показники регулювання

Якщо об'єкт має передавальну функцію (ПФ): $W_0(p) = \frac{U_0(p)}{Z_0(p)}$,

а сума некомпенсованих постійних часу виражається значенням T_μ , то регулятор, синтезується за законом

$$W_{\text{рег}}^{\text{МО}}(p) = \frac{Z_0(p)}{U_0(p) \cdot a T_\mu p},$$

де $a = 2$, носить назву регулятора, синтезованого на модульний оптимум.

При цьому показники регулювання: $\delta \leq 4,7\%$, $t_p \leq 6,3 T_\mu$, $\Delta_s^* = \Delta_p D \frac{2 T_\mu}{T}$, де T – найбільша з компенсуються постійних часу контуру.

Регулятор, який синтезується на МО, дає високу швидкодію і невисоке перерегулювання, тобто δ_p, t_p оптимальні. Однак він володіє статизмом. Якщо $\Delta_s^* < \Delta_{\text{треб}}^*$, то даний регулятор не забезпечує необхідних показників. Регулятори синтезують на симетричний оптимум, що забезпечує нульовий статизм.

Симетричний оптимум (СО) настройки регулятора.

Показники регулювання

Завжди намагаються використовувати модульний оптимум настройки регуляторів, забезпечуючи більш високу швидкодію і менше перерегулювання. При цьому перевіряють ступінь збіжності параметрів системи умові статизму згідно вище наведеної залежності.

Якщо отриманий етатизм замкнутої системи вище заданого – використовується симетричний оптимум настройки регулятора.

Якщо об'єкт має ПФ: $W_0(p) = \frac{U_0(p)}{Z_0(p)}$,

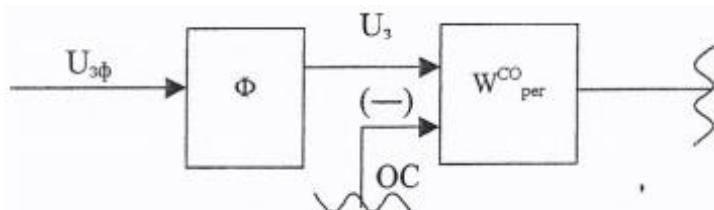
а сума некомпенсованих постійних часу виражається значенням T_μ , то регулятор, налаштований по закону

$$W_{\text{рег}}^{\text{СО}}(p) = \frac{Z_0(p)(4T_\mu p + 1)}{8T_\mu^2 p^2 \cdot U_0(p)},$$

називається регулятором, налаштованим на СО.

При цьому $\delta \leq 43\% (8\%)$,
 $t_p \leq 16 T_\mu (13 T_\mu)$,
 $\Delta_s^* = 0$

Диференціююча ланка, що міститься в чисельнику, забезпечує високе значення перерегулювання. Тому на вході регулятора ставиться фільтр:



Передавальна функція фільтра:

$$W_\phi(p) = \frac{1}{4T_\mu p + 1},$$

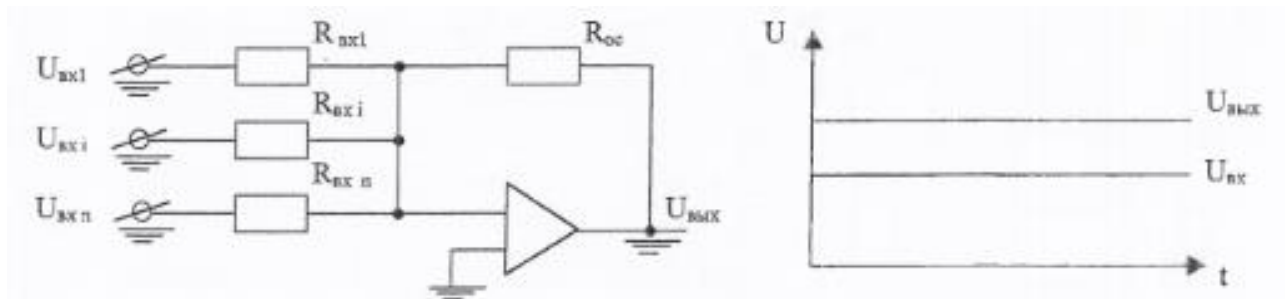
при цьому показники регулювання зменшуються до значень, вказаних в дужках.

Реалізація регуляторів на підсилювачах постійного струму (УПС)

Властивості УПС:

1. $K_y \rightarrow \infty$.
2. Має інверсний вхід по відношенню до виходу.
3. Працює з глибокими ОС (аж до закорочування).

П-регулятор (суматор)



Функція регулятора:

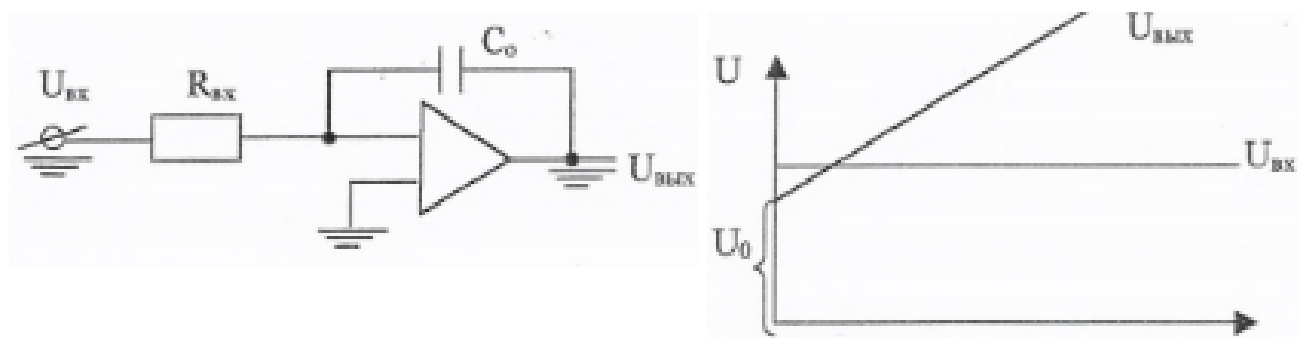
$$U_{\text{вых}} = - \sum_{i=1}^n \frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{вх}i}} U_{\text{вх}i}. \quad \text{Якщо суматор має один вхід і } R_{\text{ос}} = R_{\text{вх}} - \text{називається}$$

інвертором

Умовне позначення на схемах:



I-регулятор (інтегратор)

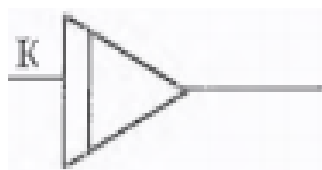


Функції регулятора:

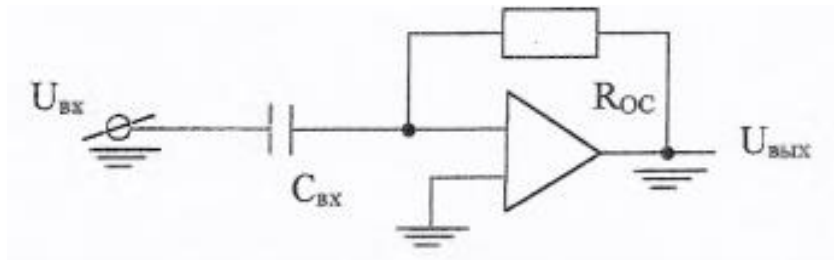
$$U_{\text{вых}}(t) = \left(- \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\text{вх}i} C_о} \int U_{\text{вх}i}(t) dt \right) + U_о(t); \quad U_{\text{вых}}(p) = \left(- \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\text{вх}i} C_о} \cdot \frac{U_{\text{вх}i}(p)}{p} \right) + U_о(p),$$

де $U_о$ - початкова умова (заряд ємності $C_о$ до початку перехідного процесу).

Умовне позначення на схемах



Д-регулятор (диференціатор)

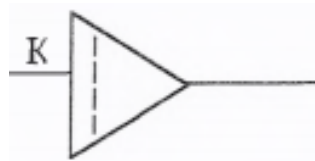


Функції регулятора:

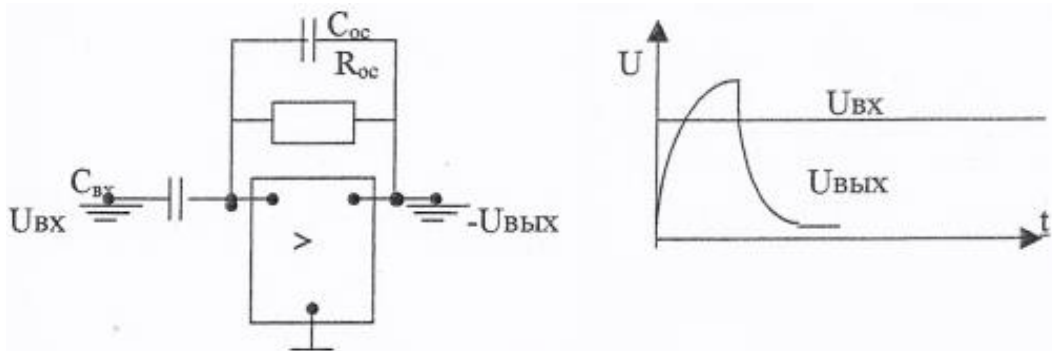
$$U_{\text{вых}}(t) = -R_{\text{ос}} C_{\text{вх}} \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}; \quad U_{\text{вых}}(p) = -R_{\text{ос}} C_{\text{вх}} U_{\text{вх}}(p) \cdot p.$$

Перехідна характеристика Д-регулятора - імпульс нескінченної амплітуди і «нульовий» - за часом. Непрацездатний через завадонебезпечність.

Умовне позначення на схемах:



Реальний диференціюючий регулятор

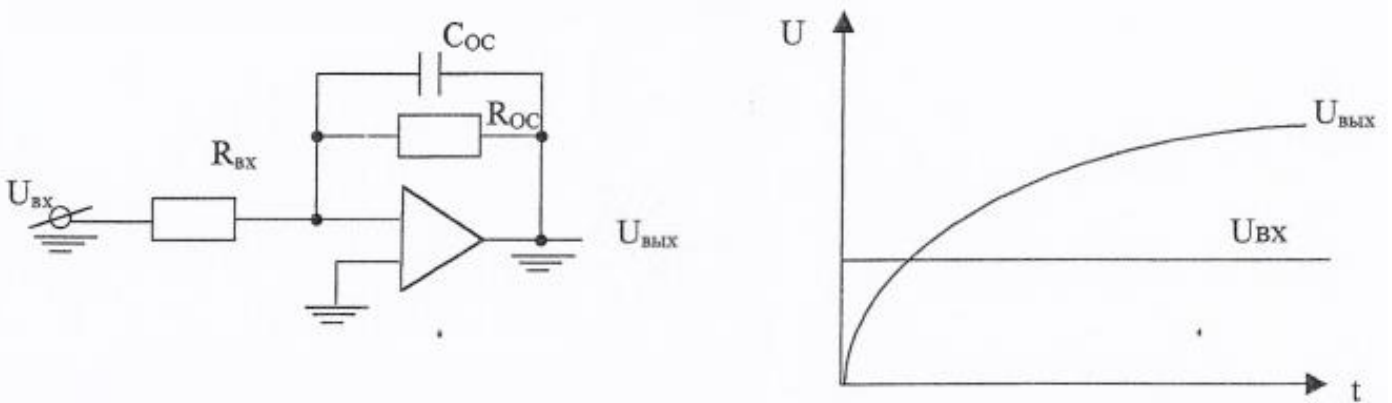


Uвх - дельта-функція.

Характеристика регулятора:

$$W(p) = \frac{Z_{\text{ос}}}{Z_{\text{вх}}} = \frac{C_{\text{вх}} R_{\text{ос}} p}{C_{\text{ос}} R_{\text{ос}} p + 1}.$$

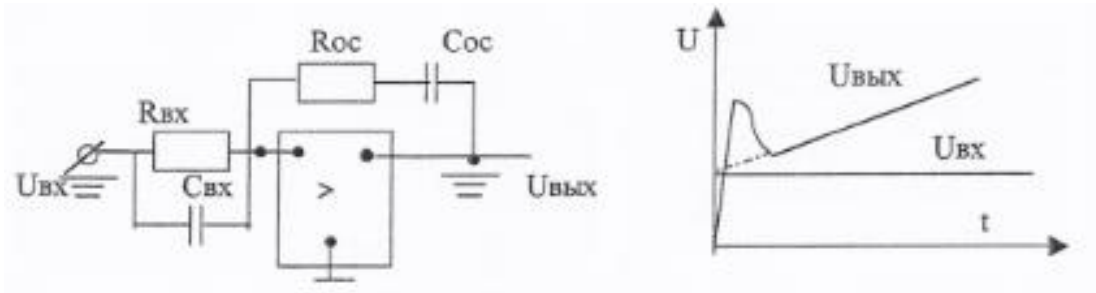
Аперіодичний регулятор



Характеристика регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{R_{oc}}{R_{ax}} \cdot \frac{1}{R_{oc}C_{oc}p + 1}$$

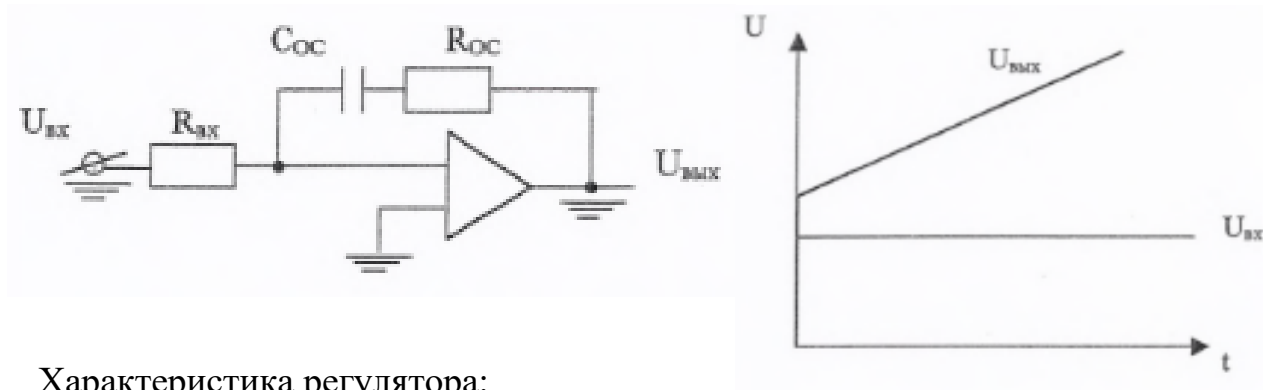
ПІД – регулятор



Характеристика регулятора:

$$W(p) = \left(\frac{R_{oc}}{R_{вх}} + \frac{C_{вх}}{C_{ос}} \right) \frac{1}{C_{ос}R_{вх}p} + C_{ос}R_{ос}p.$$

ПІ – регулятор



Характеристика регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{R_{oc}}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{ax}C_{oc}p}$$

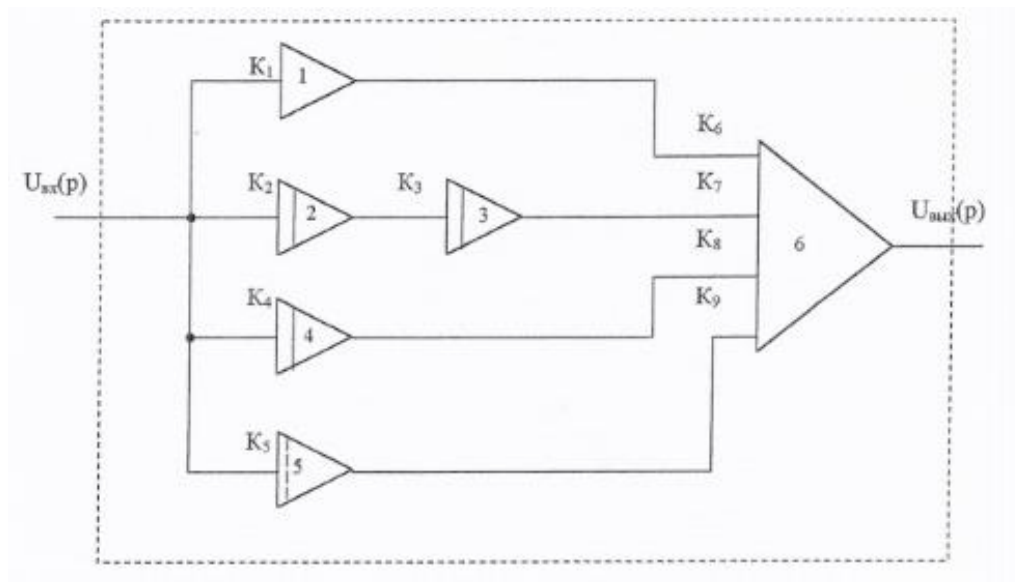
Реалізація складних регуляторів

Робиться на підставі простіших регуляторів.

Приклад. Нехай, необхідно реалізувати регулятор з функцією передачі $W_{\text{рег}}(p)$:

$$W_{\text{рег}}(p) = a + \frac{3}{p^2} + \frac{c}{p} + kp \quad (\text{працюємо в реальному масштабі часу}). \text{ Маємо}$$

чотирипаралельні гілки, кожна з яких реалізується за допомогою простих регуляторів, представлених в попередньому розділі.



Розрахунок коефіцієнтів УПТ:

$$K_1 = \frac{R_{OC}}{R_{ax}} = a; \quad K_2 = K_3 = \frac{I}{R_{ax} C_{OC}} = \sqrt{3}; \quad K_4 = \frac{I}{R_{ax} C_{OC}} = c; \quad K_5 = R_{ax} C_{OC} = K;$$

$$K_6 = K_7 = K_8 = K_9 = \frac{R_{OC}}{R_{axi}} = 1.$$

Приклад практичного розрахунку двуконтурної системи підлеглого регулювання координат дивись в: «Методичних вказівках до виконання контрольних робіт з СУЕП для заочників» (автори Гужовский А.Т. Осадчук Ю.Г. та ін.)

Список літератури

1. Системи керування електроприводами: Підручник / Ю.Г.Осадчук, І.І. Пересунько, Г.І. Ткаченко, В.О. Федотов, Д.О.Кальмус; за ред. д.т.н., проф. О.М. Сінчука – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 162 с.
2. Електротехнічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович , О.Ю. Лозинський , В.Б. Клепиков та ін. ; за ред. М.Г. Поповича , О.Ю. Лозинського. – К.: Лебідь, - 2005. – 680 с.
3. Теорія електропривода./ За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа. -1993. – 494с.
4. Лимонов Л.Г. Автоматизований електропривід промислових механізмів. – Х.: Вид-во «Форт», 2009. – 272с.
5. Основи електроприводу. Виробничих машин і комплексів. Навчальний посібник/ В.Е. Воскобойник , В.А. Борізай , Р.О. Борєва , О.Ю. Нестереня. – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка» , 2021.-254с.
6. Мазена С.С. , Маруцак Ф.Ю. , Куцак А.С. Електрообладнання промислових підприємств. Навчальний посібник – 2-е видання. Львів.: «Магнолія 2006»,2008.-260с.
7. Галай В.М. Теорія цифрових систем автоматичного керування: навчальний посібник. –Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 131 с.
8. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Сайченко О.В., Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. - К.: Аграр Медіа Груп. 2019. - 206 с.
9. Регульований електропривод: Підручник / За ред. І.М. Голодного. - К.: Аграр Медіа Груп, 2011. - 513с.
10. Електропривод: Підручник / За ред.. Ю.М.Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009.- 504 с.
11. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В., Основи електропривода. Теорія та практика. Частина І. - Вінниця: ВНАУ, 2020. - 387 с.
12. Системи керування електроприводами: Навч. посібник /А.П. Голуб та ін./ - К.:ПМКВО, 1992р.-353с.
13. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. - К.: НМК ВО, 1992. -352 с.

14. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. - Вінниця : ВНТУ, 2010. - 89 с.

15. Файнштейн В.Г., Воробейчик О.С., Цифрові системи управління електроприводів : Монографія / Під ред. Учителя А.Д.. – Кривий Ріг .: Вид-во ГВУЗ «КНУ», 2014. - 159с.

16. Перельмутер В.М. Цифрові системи управління тиристорним ЕП. –К.: «Техніка», 1983.

17. Казачковський М.М. Комплектні електроприводи : навчальний посібник / М. М. Казачковський. - Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. - 226 с.

18. Срібнер Л.А. Програмні пристрої автоматики К: «Техніка», 1982.

19. Акімов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Системи управління електроприводами постійного струму з наглядачами стану. –Харьков: ХНТУ, 1998.-117с.

20. Александров Е.Е., Богаєнко І.Н. та ін. Многоканальні системи оптимального рівня управління. Київ: Техніка, 1995.-283с.

21. Долбня В.Т. Топологічні методи аналізу й синтезу електричних систем і ланцюгів. Харків: Вища школа, 1974.-145с.

22. Коцегуб П.Х. Синтез вентильних приводів постійного струму. – Донецьк : ДПІ, 1983. -180 с.

23. Акімов Л.В. та ін. Синтез спрощених структур двох масових електроприводів з нелінійним навантаженням. –Харків: ПТУ «ХПІ», Запоріжжя: ЗНТУ, 2002.-160с.

Додаткова література

1. Долбня В.Т. Математичний опис властивостей функцій електричних ланцюгів: учбовий посібник.-К.: УМК ВО, 1991.-70с.

2. Акімов Л.В. та ін. Динаміка двох масових систем з нетрадиційними регуляторами швидкості й спостерігачами стану. –Харків: ХНТУ, 2000.-93с.

3. Автоматизовані електромеханічні системи з модальними регуляторами й спостерігачами стану. /Збірник найкращих статей Л.В. Акімов та ін. За ред. В.Б. Клепікова, Л.В. Акімова/-Харків: ХНТУ, 1997.-90с.

4. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Системи керування електроприводами» (Цикл 2, семестр 8) Для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Осадчук Ю.Г., Кривий Ріг, КНУ, 2019р.

5. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «СУЕП» для студентів спеціальності 6.050702 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» Гужовський О.Т., Осадчук Ю.Г., Філіп Ю.Б., Максимов М.М., Кривий Ріг, КТУ, 2011р.

6. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт по СУЕП, Осадчук Ю.Г., Гужовський О.Т., Кривий Ріг, КТУ, 2011г.

7. Конспект лекцій з дисципліни «СУЕП» ч.1,2. Осадчук Ю.Г. Кривий Ріг, КТУ, 2011р.

8. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «СУЕП» Частина І. Для студентів спеціальності 6.050702. Осадчук Ю.Г., Канєвський В.В.,

9. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи Комбінований метод розрахунку конструктивних параметрів ЕП з асинхронною силовою частиною (част.1). Для студентів електротехнічних спеціальностей. Сінолиций А.П., Осадчук Ю.Г., Алпатов О.В., Михайлов С.Л., Кривий Ріг, КНУ, 2017р.

10. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи Комбінований метод розрахунку конструктивних параметрів ЕП з асинхронною силовою частиною (част.2). Для студентів електротехнічних спеціальностей. Сінолиций А.П., Осадчук Ю.Г., Алпатов О.В., Михайлов С.Л., Кривий Ріг, КНУ, 2017р.

11. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №1 Автоматичне регулювання координат в електроприводі за системою ТРН-АД. Для студентів електротехнічних спеціальностей. Осадчук Ю.Г. Кривий Ріг, КНУ, 2017р.

12. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 2 Дослідження характеристик приводу ПЧ-АД з векторною системою керування. Для студентів електротехнічних спеціальностей. Осадчук Ю.Г. Кривий Ріг, КНУ, 2023 р.

13. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 3 Дослідження характеристик приводу ПЧ-АД з векторною системою керування за умови температурного дрейфу параметрів АД. Для студентів електротехнічних спеціальностей. Осадчук Ю.Г. Кривий Ріг, КНУ, 2015 р.

14. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 4 Дослідження САУ системи приводу ТП-Д за допомогою ЕОМ. Для студентів електротехнічних спеціальностей. Осадчук Ю.Г. Кривий Ріг, КТУ, 2014 р.

15. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 5 Дослідження САУ системи приводу ШП-Д за допомогою ЕОМ. Для студентів електротехнічних спеціальностей. Осадчук Ю.Г. Кривий Ріг, КТУ, 2016 р.