

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет



ЕЛЕКТРОПРИВІД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Методичні вказівки до самостійної роботи
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Автомобільна електроніка»
галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
спеціальності 171 Електроніка
(Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка)
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 621.391(07)
Е50

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛЩУК

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2026 року.

Голова вченої ради ФКІТ _____ Інна КОНДУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2026 року.

Завідувач кафедри ЕіТК _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Укладач: _____ Віктор ЛИШУК к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Рецензент: _____ Андрій ГАДАЙ к.т.н., доц. кафедри електричної інженерії ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Е50 Електропривід транспортних засобів. Методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 56 с.

Методичні вказівки призначені для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) денної та заочної форм навчання.

В. В. Лишук, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. РОЗІМКНЕНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....	5
1.1. Принципи автоматичного керування пуском електродвигунів у розімкнених релейно-контактних системах.....	5
1.2. Основні вузли релейно-контактного керування пуском двигунів постійного струму.....	6
1.3. Основні вузли схем керування гальмуванням двигунів постійного струму	9
1.4. Основні вузли схем автоматичного керування пуском та гальмуванням асинхронних двигунів при їх живленні від мережі.....	10
1.5. Основні вузли схем автоматичного керування синхронними двигунами..	14
1.6. Керування пуском синхронних двигунів з контролем швидкості та струму..	16
2. РОЗІМКНЕНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ...	20
2.1. Керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.....	20
2.2. Керування асинхронними двигунами з фазним ротором.....	22
2.3. Керування синхронними двигунами.....	25
3. СИСТЕМИ ЗАМКНЕНОГО КЕРУВАННЯ ЕП.....	27
3.1. Принципи побудови замкнених систем регульованого електроприводу...	27
3.2. Системи керування двигунами постійного струму.....	29
3.3. Системи частотного керування асинхронним двигуном.....	34
3.4. Система керування асинхронно-вентильним каскадом.....	35
3.5. Керування електроприводами з вентильними двигунами	36
4. СЛІДКУЮЧИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.....	39
4.1. Призначення та класифікація слідкуючих електроприводів.....	39
4.2. Слідкуючий електропривод релейної дії.....	40
4.3. Слідкуючий електропривод неперервної дії.....	42
4.4. Схеми слідкуючих електроприводів з неперервним керуванням.....	43
5. РОЗРАХУНКОВАЧАСТИНА	44
5.1. Завдання до виконання.....	44
5.2. Приклади розрахунку.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

Вступ

Метою дисципліни «Електропривід транспортних засобів» є формування у студентів системи теоретичних і практичних знань в області створення та функціонування автоматизованого електроприводу, вмінь виконувати розрахунки і аналіз параметрів таких електроприводів.

Завдання, які при цьому ставляться такі: опанування процесами, що відбуваються в системах автоматизованого електроприводу транспортних засобів, вивчення сучасних підходів до аналізу існуючих і проектування нових електроприводів.

У результаті вивчення дисципліни «Електропривід транспортних засобів» студент повинен знати: методи приведення інерційних мас, моментів інерції та статичних моментів опору до валу електродвигуна, механічні характеристики електроприводів постійного та змінного струму, методи регулювання кутової швидкості електроприводів, схеми та характеристики взаємозв'язаного електроприводу, способи автоматичного регулювання кутової швидкості та моменту електроприводів, методи розрахунку перехідних режимів в електроприводах, методи розрахунку потужності електроприводів, та вміти розраховувати механічні і електромеханічні характеристики різних систем електроприводу, оцінювати основні показники регулювання швидкості електроприводів, розраховувати перехідні процеси в електроприводах та потужність електроприводів у різних режимах роботи.

Самостійна робота містить такі теми:

1. Розімкнені системи автоматичного керування електроприводами.
2. Схеми розімкнених систем керування електроприводами.
3. Системи замкненого керування електроприводами.
4. Слідкуючий електропривод.

1 РОЗІМКНЕНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

1.1 Принципи автоматичного керування пуском електродвигунів у розімкнених релейно-контактних системах

Керування електроприводами полягає у здійсненні пуску, регулювання швидкості, гальмування, реверсування, а також у підтриманні режимів роботи приводу згідно з вимогами технологічного процесу.

Автоматизація пускового процесу значно полегшує керування електродвигунами, усуває можливі помилки при пуску та веде до збільшення продуктивності механізмів.

Розрізняють такі принципи автоматичного керування при пуску:

- керування в функції швидкості (ЕРС);
- керування в функції струму;
- керування в функції часу.

1.2 Основні вузли релейно-контактного керування пуском двигунів постійного струму

1.2.1 Керування в функції швидкості (ЕРС)

Керування в функції швидкості потребує контролю швидкості з наступною дією на відповідний апарат. Швидкість двигуна часто фіксується непрямим методом та вимірюванням параметрів, які однозначно зв'язані зі швидкістю. Для двигуна постійного струму (ДПС) це ЕРС, яка пропорційна швидкості.

На рисунку 1.1 наведений вузол схеми автоматичного пуску ДПС з незалежним збудженням в функції ЕРС. При такому приєднанні контакторів прискорення КП1, КП2 та КП3 вдається вирівняти напруги втягування для всіх трьох котушок. Контактори повинні спрацьовувати при заданих швидкостях ω_1 , ω_2 та ω_3 .

Напруги втягування дорівнюють:

$$U_{КП1} = c\omega_1 + I(R_{Я} + R_2 + R_3),$$

$$U_{КП2} = c\omega_1 + I(R_{Я} + R_3),$$

$$U_{КП3} = c\omega_1 + IR_{Я}.$$

Через належний вибір точок приєднання контакторів КП2 та КП3 напруги втягування мало відрізняються одна від одної, тому

катушки контакторів можуть бути вибрані на однакову напругу втягування.

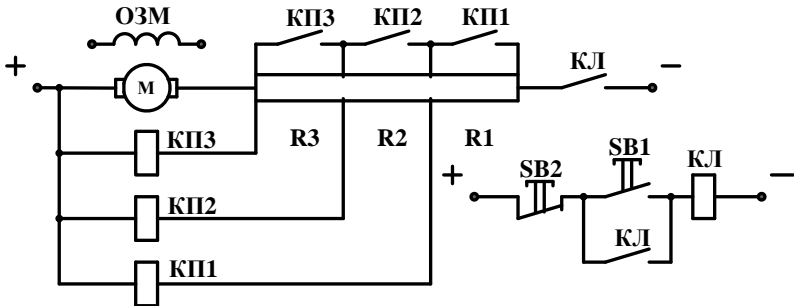


Рисунок 1.1 – Вузол схеми автоматичного керування пуском ДПС в функції ЕРС

Схема працює так. Під час натиснення кнопки SB1 спрацює лінійний контактор КЛ, який переходить на саможивлення та підключає якор двигуна М до мережі через пусковий резистор. Після кидка струму двигун починає розганятись і його швидкість та ЕРС зростає. Коли напруга на затискачах двигуна досягне значення напруги втягування контактора КП1, останній спрацює та зашунтує першу ступінь пускового резистора R1. Після кидка струму двигун продовжує розганятись. Коли напруга на затискачах двигуна досягне значення напруги втягування контактора КП2, останній спрацює та зашунтує другу ступінь пускового резистора R2. Далі процес розгону протікає аналогічно.

Подібні схеми зустрічаються в електроприводах малої потужності, головним чином у металорізальних верстатах.

1.2.2 Керування в функції струму

Струм під час пуску двигуна коливається у деяких певних межах. Початковий стрибок струму визначається значеннями необхідного пускового моменту M_{II} та допустимого струму $I_{дон}$. У мірі збільшення швидкості двигуна його струм зменшується. У момент зменшення струму до певного значення частина пускового резистора шунтується, що призводить до нового стрибка струму до $I_{дон}$.

Струм перемикання I_2 вибирають виходячи з необхідності забезпечити потрібне мінімальне прискорення при пуску двигуна із

заданим навантаження, тому струм перемикання вибирають більшим за статичний струм.

На рисунку 1.2 наведений вузол схем автоматичного пуску ДПС з незалежним збудженням в функції струму.

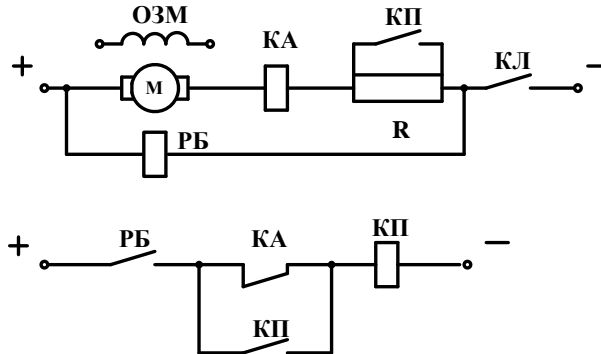


Рисунок 1.2 – Вузол схеми автоматичного керування пуском ДПС в функції струму

При вмиканні контактора КЛ отримує живлення котушка струмового реле КА та його розмикаючий контакт у колі контактора КП на початку пуску розмикається. Отже, пуск починається з повністю веденим резистором R у колі якоря двигуна. Контакт реле РБ не дозволяє контактору КП ввімкнутись відразу ж після вмикання контакту КЛ, оскільки власний час вмикання реле РБ вибирається більшим за власний час вмикання реле РП.

Коли струм відпускання реле РП буде дорівнювати I_2 , спрацює контактор КП й зашунтує пусковий резистор R. При цьому контактор КП не вимкнеться через те, що контакт реле КА буде зашунтований контактом КП. Перевагою схеми є те, що перемикання здійснюється при певних значеннях струму в якірному колі, які не залежать від коливань напруги в мережі.

Недоліком є те, що при пуску двигуна, коли статичний момент M_c перевищує момент перемикання M_2 , резистор R не буде вимкненим, що може призвести до його перегорання, оскільки він не розрахований на тривалу роботу.

1.2.3 Керування в функції часу

У цьому випадку відсутня небезпека тривалої роботи двигуна на низькій швидкості, оскільки застосовується максимальний захист.

Для автоматизації пуску ДПС у функції часу часто застосовується реле часу. Витримка часу в деяких із них досягається за рахунок замикання накоротко котушки реле після зняття напруги. У цьому випадку магнітний потік у котушці спадає повільно, оскільки стала часу котушки при притягнутому якорі порівняно велика. Ці реле можуть мати контакти, які працюють з витримкою часу лише при вимкненні. В інших електромагнітних реле витримка часу забезпечується за рахунок встановлення мідної гільзи на осердді реле.

На рисунку 1.3 наведено схему з двома варіантами застосування електромагнітних реле як реле часу.

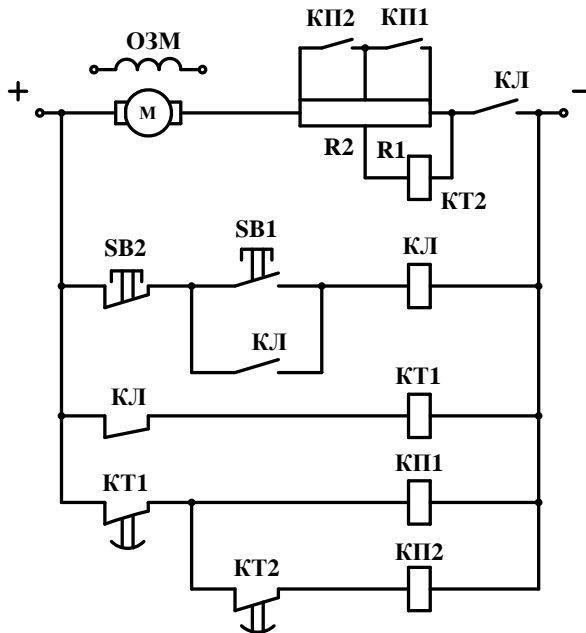


Рисунок 1.3 – Вузол схеми автоматичного керування пуском ДПС в функції часу

Перша ступінь керується за допомогою реле КТ1, яке має мідну гільзу, а друга ступінь керується за допомогою реле КТ2 без гільзи. Для отримання витримки часу в реле КТ2 необхідно замикати його котушку накоротко. З цією метою котушка реле КТ2 включається

Припустимо, що до початку гальмування двигун працює з установленою швидкістю на природній характеристиці, контактори КЛ та КП ввімкнені. Котушка контактора КГ знеструмлена, оскільки її коло розімкнено розмикаючим контактом КЛ. При цьому якір двигуна не замкнений на гальмівний опір R_2 . Оскільки замикаючий контакт КЛ закритий, має живлення котушка реле часу КТ і його замикаючий контакт у колі контактора КГ замкнений. Під час натиснення кнопки SB2 втрачає живлення котушка КЛ, вимикається якір двигуна від мережі, розривається коло котушки КТ й воно починає відлік часу. Одночасно отримує живлення котушка контактора КГ і його силовий контакт підключає якір двигуна до гальмівного опору R_2 . Починається процес динамічного гальмування. Після закінчення витримки часу реле КТ своїм замикаючим контактом вимикає контактор КГ.

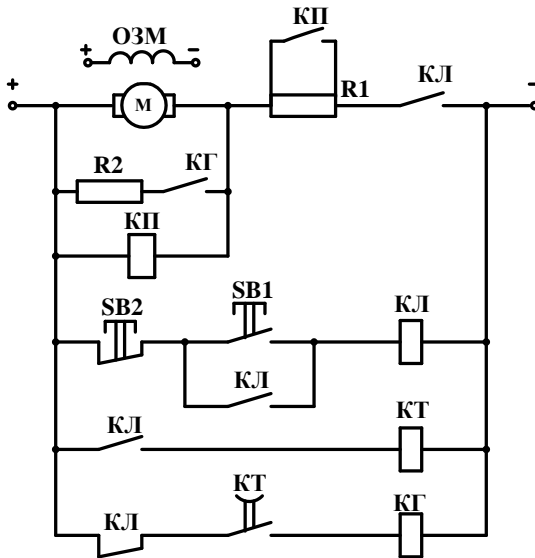


Рисунок 1.5 – Вузол схеми автоматичного керування динамічним гальмуванням ДПС з НЗ в функції часу

1.4 Основні вузли схем автоматичного керування пуском та гальмуванням асинхронних двигунів при їх живленні від мережі

Схема пуску асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором (ФР) в функції часу наведена на рисунку 1.6.

Під час подачі живлення у коло керування спрацьовують реле часу КТ1 та КТ2, які без витримки часу вимикають котушки контакторів прискорення КП1 й КП2. Після натиснення кнопки SB1 та вмикання контактора КЛ статор двигуна М підключається до мережі. Двигун пускається в хід з повністю ввімкненими резисторами R_1 і R_2 , що обмежує пусковий струм та забезпечує необхідне кутове прискорення приводу. Під час вмикання контактора КЛ його розмикаючий контакт у колі реле КТ1 розмикається. Реле КТ1 з певною витримкою часу своїм контактом вмикає контактор КП1, який шунтує першу ступінь пускового резистору. Розмикаючий контакт контактора КП1 у колі реле КТ2 розмикається. Реле КТ2 з певною витримкою часу замикає свій контакт у колі контактора КП2, який шунтує другу ступінь пускового резистора.

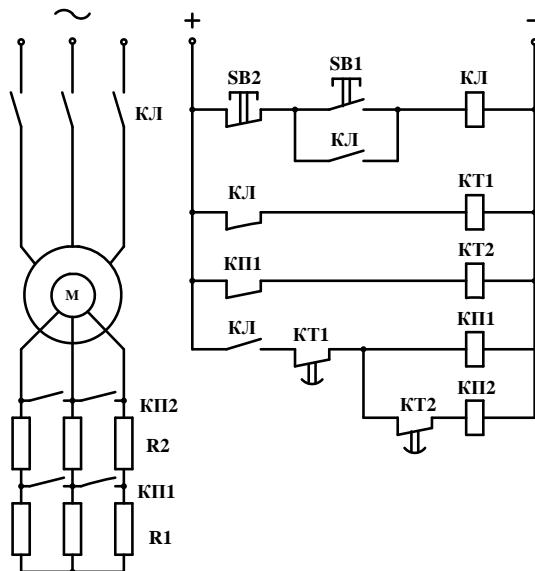


Рисунок 1.6 – Спрощена схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором в функції часу

Двигун виходить на природну характеристику.

На рисунку 1.7 наведена схема гальмування противмиканням АД з ФР в функції швидкості (ЕРС ротора, яка пропорційна ковзанню).

Реле РПВ налагоджується за допомогою опору R_p , так, щоб на початку гальмування, коли ковзання $s=2$, воно спрацює, а при швидкості $\omega \approx 0$, коли $s=1$, напруга на котушці реле різко падає (майже у двічі) і реле відпускає свій якір. При пуску у зворотному напрямку реле РПВ не спрацює, оскільки ЕРС ротора стає меншим, досягаючи нульового значення при $s=0$.

Пуск двигуна здійснюється в одну ступінь R . Ступінь $R_{ПВ}$ служить для обмеження струму при гальмуванні. Натисненням кнопки SB1 (SB2) подається живлення на котушку контактора КВ (КН) і статор двигуна підключається до мережі, вмикається реле РБ. Реле РБ замикає свій контакт у колі контактора КПВ, який шунтує ступінь $R_{ПВ}$. За допомогою механічного маятникового реле часу КТ, прибудованого до контактора КПВ, здійснюється витримка часу, яка необхідна для пуску двигуна, після чого вмикається контактор прискорення КП та шунтує опір R .

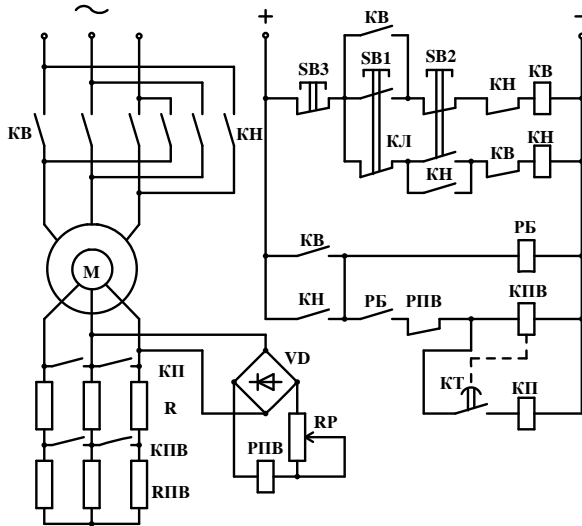


Рисунок 1.7 – Схема гальмування проти вмиканням асинхронного двигуна з фазним ротором

Для реверсування двигуна натискають кнопку SB2. Контактори КВ та КПВ вимикаються, але вмикається контактор КН і двигун переводиться у режим гальмування противмиканням. Реле РПВ своїм контактом розриває коло котушки контактора КПВ, що забезпечує під

час гальмування введення опорів R й $R_{ПВ}$ у коло ротора. Реле РВ служить для створення тимчасового розриву у колі котушки контактора КПВ. Воно вимикається разом з контактором КВ, а вмикається тільки після замикання контактів КН. Коли контакт РВ замкнеться, вже встигає спрацювати реле РПВ. Після закінчення процесу гальмування контакт РПВ замкнеться й контактор КПВ зашунтує опір $R_{ПВ}$.

Схема динамічного гальмування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у функції часу наведена на рисунку 1.8.

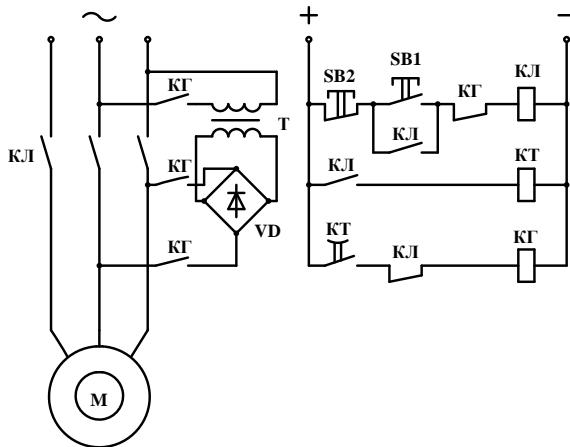


Рисунок 1.8 – Схема динамічного гальмування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у функції часу

До початку гальмування, коли двигун підключений до мережі змінного струму, коло живлення котушки реле часу КТ замкнено через замикаючий контакт контактора КЛ. Замикаючий контакт КТ ввімкнений, але завдяки контакту КЛ котушка контактора КГ знеструмлена. При вимкненні КЛ розмикаються коло статора двигуна та коло котушки реле КТ. Контакт КЛ вмикає контактор КГ.

У цьому випадку через понижувальний трансформатор Т, випрямний міст VD та замкнені контакти КГ подається постійний струм у дві фази обмотки статора, внаслідок чого здійснюється динамічне гальмування до повної зупинки.

Після закінчення гальмування двигуна відходить якір реле КТ та вимикається контактор КГ. Отже, гальмування здійснюється в функції часу, що задається витримкою часу реле КТ, величина якої складає:

$$t_{KT} \geq J \int_0^{\omega_{пощ}} \frac{d\omega}{M_G + M_C},$$

де J – момент інерції приводу; M_G – гальмівний момент; M_C – момент опору.

1.5 Основні вузли схем автоматичного керування синхронними двигунами

Синхронні двигуни (СД) застосовуються в приводах середньої та великої потужності для механізмів, які працюють з постійною швидкістю.

Синхронні електроприводи відносно вимог до пускових режимів та умов автоматичного регулювання збудження можна поділити на три класи:

- 1) приводи з навантаженням, яке мало змінюється;
- 2) приводи з пульсуючим навантаженням;
- 3) приводи з різко змінним навантаженням.

Автоматичне керування синхронним приводом передбачає процеси пуску, синхронізації, ресинхронізації, гальмування та автоматичного регулювання струму збудження. У даний час пуск СД здійснюють при повній або пониженій напрузі.

У схемі на рисунку 1.9 статор на початку пуску підключається через реактор Р, оскільки вимикач В1 ввімкнений, а вимикач В2 – вимкнений. Під час пуску двигуна та досягненні ним підсинхронної швидкості статор підключається на повну напругу шляхом вмикання вимикача В2, який закорочує реактор Р. Автоматизація пуску здійснюється в функції часу.

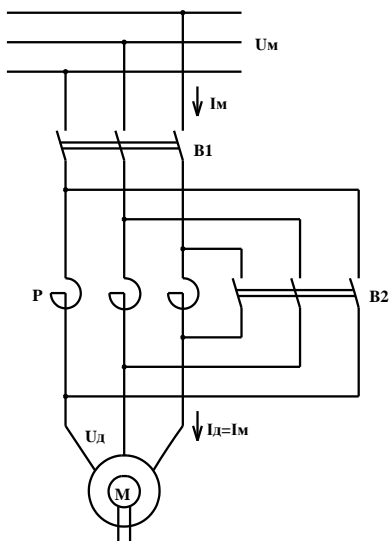


Рисунок 1.9 – Схема реакторного пуску синхронного двигуна

На рисунку 1.10 наведена схема обмеження кидків пускового струму за допомогою вмикання автотрансформатора АТ у коло статора. Ввімкнення комутаційних пристроїв здійснюється у такій послідовності: спочатку вмикаються вимикачі В1 та В3, а потім з витримкою часу вимикається вимикач В3 та вмикається вимикач В2. Незважаючи на те, що ця схема складніша, дорожча та менш надійніша, вона споживає із мережі струм менший, ніж при реакторному пуску, оскільки струм зворотно пропорційний напрузі

$$\frac{I_M}{I_d} = \frac{U_d}{U_M}, \text{ тоді як при реакторному пуску } I_d = I_M. \text{ При однаковому}$$

пусковому струмі, що споживається із мережі, в схемі з автотрансформатором буде забезпечений більший пусковий момент СД.

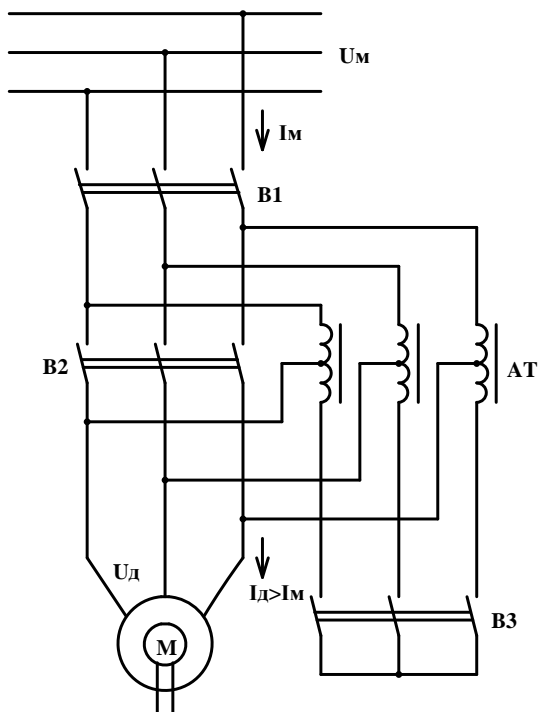


Рисунок 1.10 – Схема автотрансформаторного пуску синхронного двигуна

1.6 Керування пуском синхронних двигунів із контролем швидкості та струму

Пуск СД складається із трьох етапів:

- розгін двигуна до підсинхронної швидкості;
- подача збудження в обмотку ротора;
- синхронізація з мережею.

Розгін СД до підсинхронної швидкості було розглянуто в п. 1.5.

Подача збудження в обмотку ротора СД здійснюється від збудника G (рисунок 1.11, а) або напівпровідникового випрямляча (рисунок 1.11, б). Синхронізація СД з мережею відбувається автоматично при підсинхронній швидкості та наявності збудження.

Залежно від моменту подачі повної напруги на обмотку статора СД у поєднанні з подачею збудження в обмотку ротора існують три види пуску СД:

- прями́й;
- ва́жкий;
- ле́гкий.

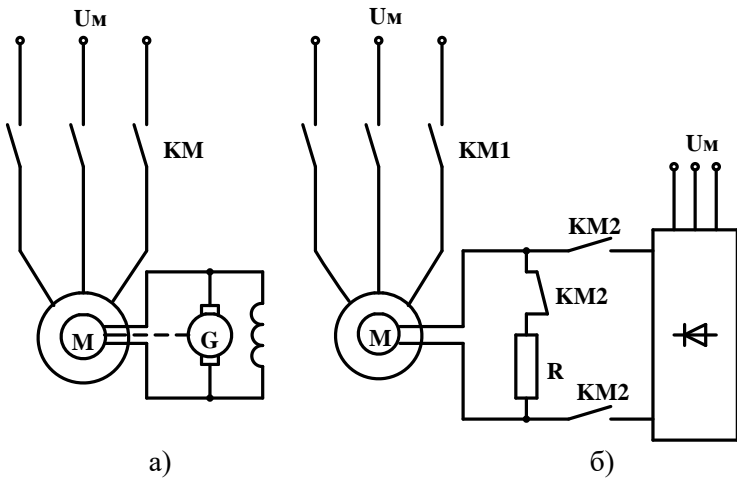


Рисунок 1.11 – Схеми подачі збудження в обмотку ротора СД

При прямому пуску на обмотку статора подається повна напруга U_M , а коло обмотки ротора підключається наглухо до якоря збудника (рисунок 1.11,а). Цей пуск можливий при наявності трьох умов:

- коли дозволяє потужність мережі;
- коли час розгону до підсинхронної швидкості менший за час самозбудження збудника, щоб подача напруги в ротор відбувалася після досягнення підсинхронної швидкості;
- коли $M_c \leq 0,4M_{ном}$ синхронного двигуна, що гарантує розгін без зупинки на половині синхронної швидкості.

Зупинка СД на половині синхронної швидкості можлива через наявність в механічній характеристиці провалу моменту на $0,5\omega_c$ внаслідок взаємодії короткозамкненої обмотки ротора та поля статора й створення моменту одновісного вмикання. Під час прямого пуску синхронізація з мережею відбувається автоматично після самозбудження збудника. Коли умови не виконуються, то застосовують прямий пуск з розрядним опором R в обмотці збудження ротора (рис. 1.12), який вимикається при розгоні СД.

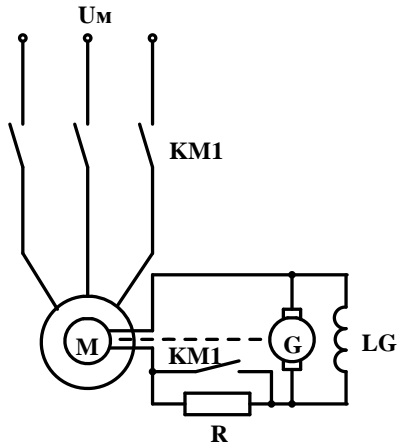


Рисунок 1.12 – Схема прямого пуску СД із розрядним опором

Розрядний резистор обмежує струм збудження під час пуску, покращуючи цим механічну характеристику СД, та забезпечує прискорене гасіння поля СД після вимкнення двигуна із мережі, що знижує аварійне руйнування обмотки при короткому замиканні. Розрядний опір вибирається із умови:

$$R = (8 \dots 10) R_p,$$

де R_p – опір ротора.

Під час пуску СД зі зниженою напругою мережі розрізняють легкий та важкий пуск. При легкому пуску збудження подається при пониженій напрузі мережі. Цей від пуску застосовують при малих моментах опору на валу двигуна. При важкому пуску збудження подається при повній напрузі мережі. Цей від пуску застосовують при великих моментах опору на валу двигуна.

Керування моментом подачі збудження можливе з контролем швидкості (рис. 1.13, а) або струму (рис. 1.13, б).

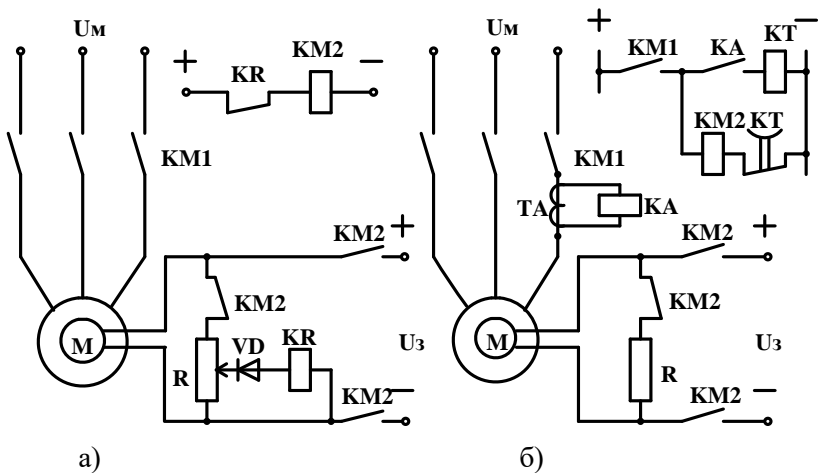


Рисунок 1.13 – Схеми для керування моментом подачі збудження з контролем швидкості (а) та струму(б)

У схемі з контролем швидкості (рис. 1.13, а) підключення обмотки збудження до напруги U_3 здійснюється контактором КМ2, який керується реле швидкості КР. Котушка цього реле зв'язана з частиною розрядного резистора R через діод VD .

Під час вмикання контактора КМ1 обмотка статора СД підключається до мережі та створює обертове магнітне поле, яке викличе появу моменту двигуна, під дією якого він почне розгін, та ЕРС в обмотці збудження СД. Під дією ЕРС обмоткою реле КР почне протикати випрямлений струм, воно спрацює та розірве коло живлення контактора КМ2. Тим самим розгін СД буде відбуватись без струму збудження з замороженою на опір R обмоткою збудження.

При зростанні швидкості ротора його ЕРС та струм в котушці реле КР зменшуються. При підсинхронній швидкості струм в котушці реле КР стане меншим за струм відпускання. Реле КР вимкнеться та викличе ввімкнення контактора КМ2. Контактор КМ2 підключить обмотку збудження до напруги U_3 та відбудеться синхронізація СД з мережею.

Схема з контролем струму (рис. 1.13, б) містить реле струму КА, обмотка якого живиться від трансформатора струму ТА, та реле часу КТ. При підключенні СД до мережі контактором КМ1 у колі обмотки статора виникає кидок пускового струму, що призводить до спрацювання реле КА та вимкнення контактора КМ2. Розгін СД

здійснюється із замкненою на опір R обмоткою збудження. Наприкінці пуску при підсинхронній швидкості та зменшенні струму в колі статора вимикається реле КА й котушка реле КТ втрачає живлення. Через певну витримку часу вмикається контактор КМ2 та через його контакти обмотка збудження підключається до напруги U_3 , після чого СД втягується у синхронізм.

2 РОЗІМКНЕНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

2.1 Керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором

У схемі розімкненого керування асинхронним двигуном (АД) з короткозамкненим ротором у якості силових елементів використовуються тиристори в комбінації з релейно-контактними апаратами у колі керування. Тиристори виконують роль силових комутаторів та дозволяють здійснити необхідний темп зміни напруги на статорі двигуна через регулювання кута вмикання тиристорів. При неперервній зміні кута вмикання тиристорів під час пуску можна обмежити струми та моменти двигуна.

Ефективне динамічне гальмування має місце в схемах із заспокою вальними контурами. Застосування одного шунтувального тиристора, який замикає коло струму між двома фазами, призводить до збільшення постійної складової струму, що створює достатній гальмівний момент в області високої куткової швидкості.

На рисунку 2.1 наведена схема тиристорного керування пуском та гальмуванням АД з короткозамкненим ротором.

При натисненні кнопки П вмикаються реле РП1 та РП2 і на керуючі електроди тиристорів VS1 – VS4 подаються імпульси, які зсунуті на 60° відносно напруги живлення. До статора двигуна підводиться понижена напруга, а тому знижується пусковий струм та пусковий момент. Двигун починає розганятись. Розмикаючий контакт реле РП1 виключає реле РПН з витримкою часу, яка визначається опором R7 та ємністю C4. Розмикаючими контактами РПН шунтуються відповідні резистори в блоці керування БК тиристорами, і до статора підводиться повна напруга мережі.

При натисненні кнопки С втрачає живлення релейна схема керування, тиристори VS1-VS4 вимикаються і напруга з статора двигуна знімається. Вмикається за рахунок енергії в ємності C5 на час гальмування реле РКГ, яке своїми контактами вмикає тиристори VS2 та VS5. Через фази А та В обмотки статора протікає постійний струм, який забезпечує динамічне гальмування. У схемі передбачено кроковий режим. При натисненні кнопки К вимикаються реле РК1 та тиристори VS2, VS5, а вмикаються на короткий час за рахунок енергії в ємності C6 реле РК2 та тиристор VS3.

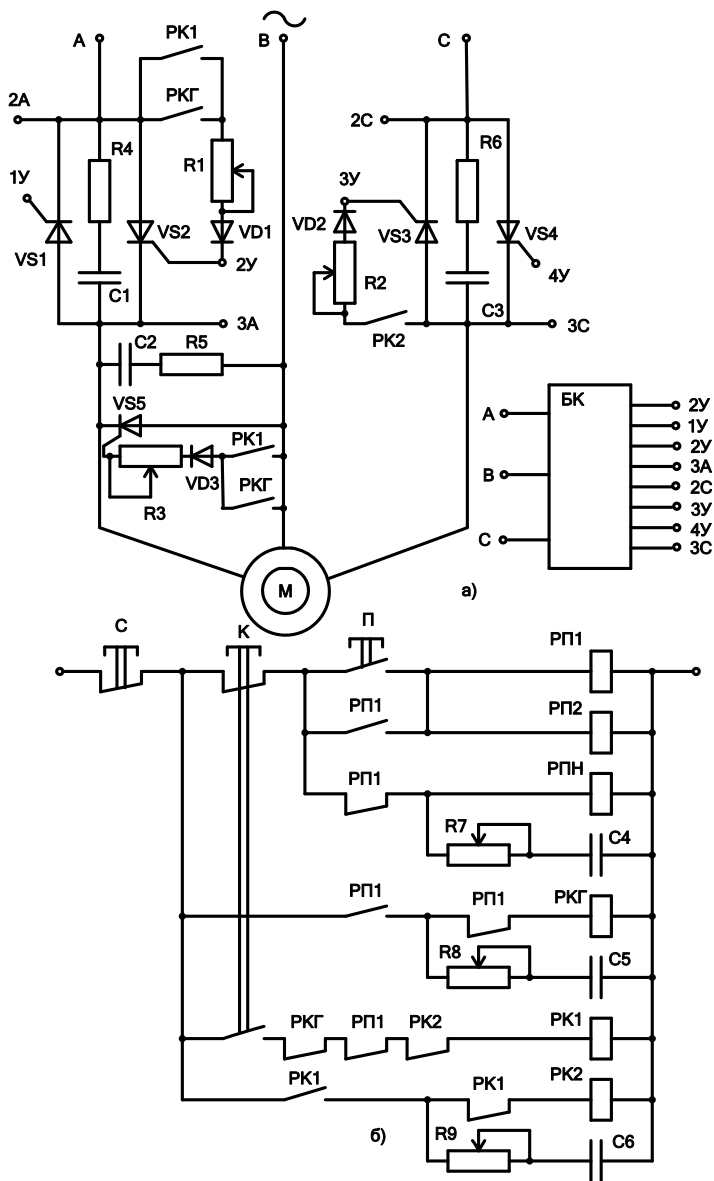


Рисунок 2.1 – Схема тиристорного керування пуском та гальмуванням АД з короткозамкненим ротором

У результаті цього ротор двигуна здійснює крок. Розмір кроку строго не фіксований і залежить від напруги мережі U_M , моменту опору M_C , моменту інерції приводу та від середнього значення випрямленого струму.

2.2 Керування асинхронними двигунами з фазним ротором

Схема пуску АД з фазним ротором в одну ступінь в функції часу та гальмування противмиканням в функції ЕРС наведена на рисунку 2.2. У вихідному стані, коли подана напруга живлення, спрацьовує реле часу КТ та своїм розмикаючим контактом розриває коло живлення контактора КМ3, що запобігає передчасному шунтуванню пускових резисторів у колі ротора двигуна.

Ввімкнення АД здійснюється натисканням кнопки SB1, після чого вмикається контактор КМ1. Статор АД підключається до мережі, електромагнітне гальмо розгальмовується і починається розгін двигуна. Одночасно спрацьовує контактор КМ4 і своїми контактами шунтує ступінь противмикання, а також розриває коло реле КТ. Реле КТ з витримкою часу замикає свій контакт у колі контактора КМ3, який спрацьовує та шунтує опір R_1 у колі ротора двигуна. АД виходить на природну характеристику.

Керування гальмуванням здійснює реле KV, яке контролює рівень ЕРС ротора. За допомогою регульовального опору R_p реле KV налагоджено таким чином, щоб при пуску ($0 < s < 1$) наведеної у роторі ЕРС буде недостатньо для його вмикання, а в режимі проти вмикання ($1 < s < 2$) - достатньо.

Для здійснення гальмування АД натискується кнопка SB2, яка розмикає коло живлення контактора КМ1. АД вимикається із мережі, вимикається контактор КМ4 та замикається коло живлення реле КТ. В результаті вимикається контактор КМ3 та у коло ротора двигуна вводиться опір $R_1 + R_2$. Одночасно замикається коло живлення контактора КМ2, який знов підключає АД до мережі, але з іншим чергуванням фаз. АД переходить у режим гальмування противмиканням. Реле KV спрацьовує і після відпускання кнопки SB2 буде забезпечувати живлення контактора КМ2 через свій контакт та замикаючий контакт КМ2.

Наприкінці гальмування, коли швидкість обертання близька до нуля, ЕРС ротора зменшиться і реле KV відключиться та своїм контактом розімкне коло котушки контактора КМ2. Контактор КМ2

відключає АД від мережі і схема приходить у вихідне положення. Після вимкнення контактора КМ2 гальмо УВ забезпечить фіксацію вала АД.

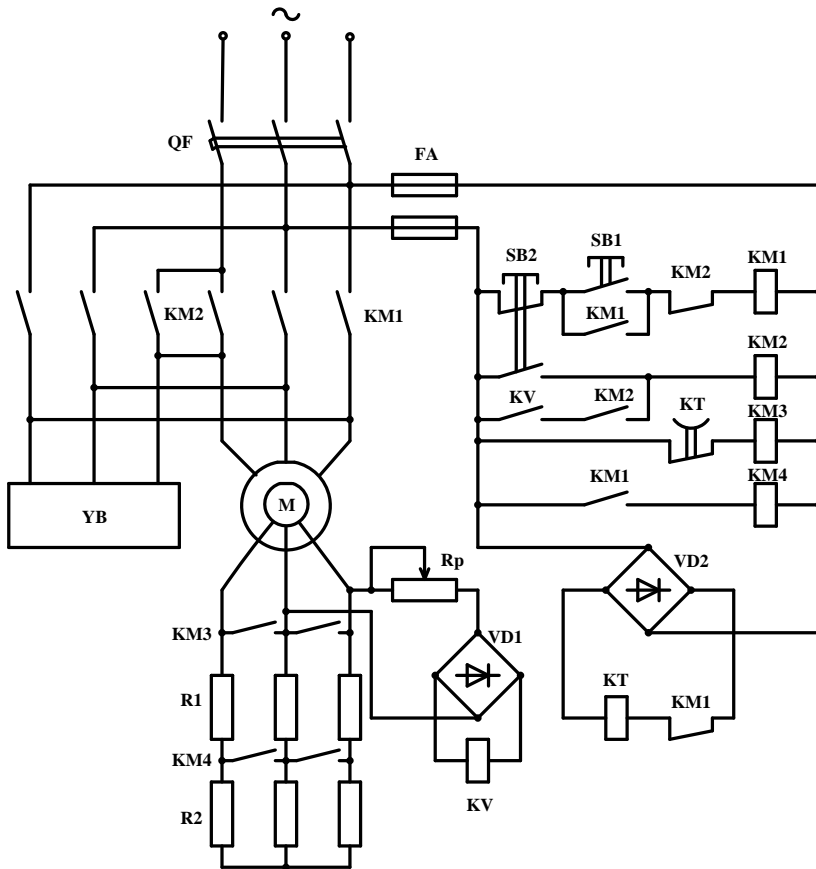


Рисунок 2.2 – Схема пуску АД з фазним ротором в одну ступінь в функції часу та гальмування противмиканням у функції ЕРС

Схема пуску АД в одну ступінь у функції струму та динамічного гальмування в функції швидкості наведена на рисунку 2.3.

При натисканні кнопки SB1 вмикається контактор КМ1, який переходить на саможивлення та підключає статор двигуна до мережі. Кидок струму у колі ротора викличе вмикання реле струму КА та розмикання кола контактора КМ2. Розгін АД почнеться з введеним опором R_1 у колі ротора. Ввімкнення контактора КМ1 призводить

також до розмикання кола контактора КМ3 та вмикання реле КВ. Однак це не викличе ввімкнення контактора КМ2, оскільки до цього розімкнеться контакт реле КА.

В міру збільшення швидкості АД зменшуються ЕРС та струм в роторі. Коли струм в роторі буде рівним струму відпускання реле КА, воно вимкнеться та своїм контактом подасть живлення на контактор КМ2. Контактор КМ2 спрацює та зашунтує опір R_1 . АД виходить на природну характеристику.

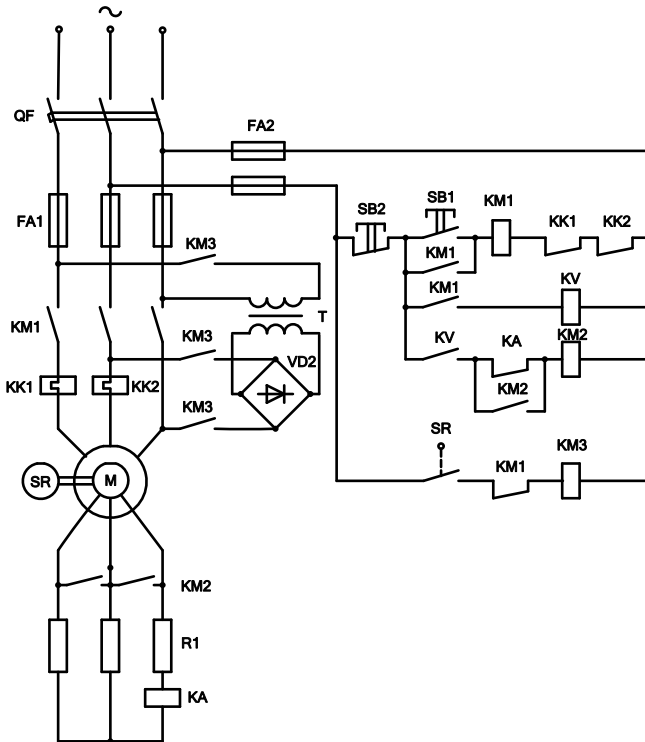


Рисунок 2.3 – Схема пуску АД в одну ступінь в функції струму та динамічного гальмування в функції швидкості

Обертання АД викличе замикання контакту реле швидкості SR у колі контактора КМ3, але він не спрацює, оскільки розімкнеться контакт контактора КМ1. При натисканні кнопки SB2 контактор КМ1 втрачає живлення та вимикає АД від мережі. Контакти КМ1

вмикають контактор КМ3, який своїми контактами вмикає коло живлення постійного струму в дві фази обмотки статора двигуна.

АД переходить у режим динамічного гальмування. Одночасно втрачають живлення реле КV та контактор КМ2, що призведе до введення у коло ротора опору R_1 . При швидкості близької до нуля реле SR розімкне свій контакт у колі контактора КМ3. Контактор КМ3 вимкнеться та припинить гальмування АД. Схема прийде у вихідне положення.

2.3 Керування синхронними двигунами

Перевагою тиристорних перетворювачів (ТП) для збудження СД порівняно з електромашинними є їх висока швидкодія. ТП володіє більш високим коефіцієнтом корисної дії, але коефіцієнт потужності у нього нижчий ніж у електромашинного. Оскільки СД може бути джерелом реактивної потужності, а потужність збудника не перевищує декількох відсотків потужності приводу, то низький коефіцієнт потужності ТП не позначається на виборі типу збудника.

ТП є більш надійним ніж електромашинний. Слід відмітити додаткові переваги ТП: безшумність, скорочення площі та відсутність фундаменту, можливість використання в системах автоматичного керування та малі сигнали керування.

Принципова схема з тиристорним збудником наведена на рисунку 2.4. Перед пуском необхідно подати живлення в кола керування за допомогою автоматичного вимикача QF та роз'єднувачів В1, В2, а також на трансформатор Т2.

При вмиканні оливоного вимикача В подається живлення на статор двигуна М та котушку контактора К, призначеного для вмикання допоміжного АД вентилятора для охолодження тиристорів ТП. Вмикаються реле РПС (пусковим струмом), реле часу КТ1, КТ2 та реле інвертного режиму РІ.

Спочатку здійснюється асинхронний пуск двигуна М. СД розганяється до підсинхронної швидкості, при якій пусковий струм знижується і реле РПС розмикає свій контакт у колі реле часу КТ1, яке вмикає з необхідною витримкою часу реле РП1. Реле РП1 блокує замикаючий допоміжний контакт В у колі контактора К, стає на саможивлення через контакт КТ2, а також подає напругу на блок керування тиристорним перетворювачем БКТП. Тиристири ТП відкриваються та в обмотку збудження СД подається постійний струм. СД втягується у синхронізм.

При вимкненні вимикача В втрачає живлення реле КТ2 та РІ, яке своїм контактом діє на БКТП переводячи його в інверторний режим, який забезпечує гасіння поля СД. Після витримки часу, яка трохи більша за час гасіння поля, реле КТ2 розмикає свій контакт у колі РП1. Вимикаються реле РП1 та контактор К, відключається БКТП та двигун вентилятора охолодження вентиляторів. Схема приходиться у вихідне положення. БКТП містить ще автоматичний регулятор збудження. Варистор R_p служить для захисту ТП від перенапруг.

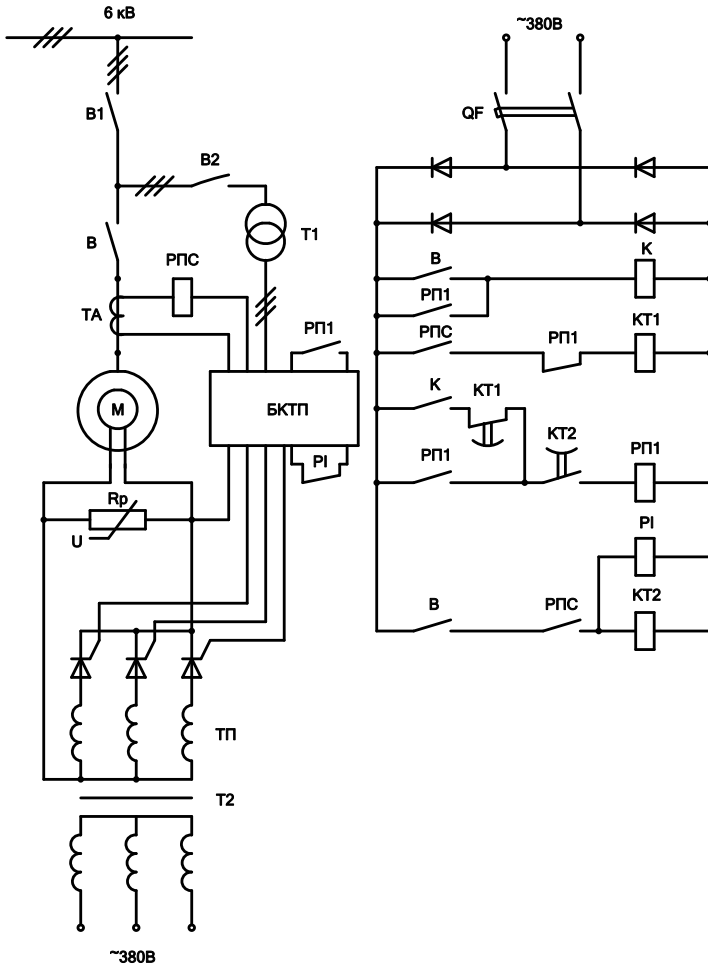


Рисунок 2.4 – Принципова схема синхронного електропривода з тиристорним збудником

3 СИСТЕМИ ЗАМКНЕНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

3.1 Принципи побудови замкнених систем регульованого електроприводу

Сучасні системи замкненого керування електроприводом призначені також, як і розімкнені системи релейно-контактного керування, для забезпечення автоматичного режиму пуску, гальмування, реверсування, регулювання швидкості, моменту і т.п. Однак ці системи дозволяють сформувати зазначені режими керування бажаним чином та зв'язати їх більш точно з вимогами технологічного процесу.

Найбільш поширені два типи замкнених систем керування: 1) з одним загальним підсумовуючим підсилювачем (рис. 3.1,а); 2) з n послідовними підсумовуючими підсилювачами (рис. 3.1,б) – так звані системи підпорядкованого керування з послідовною корекцією.

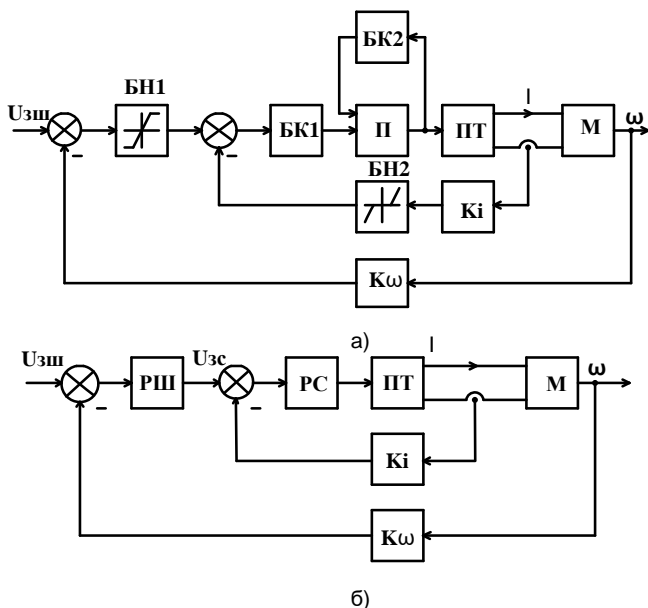


Рисунок 3.1 – Типи замкнених систем керування: а) з одним загальним підсумовуючим підсилювачем; б) з n послідовними підсумовуючими підсилювачами

Особливістю системи, яка побудована за схемою на рисунку 3.1,а, є наявність одного підсумовуючого підсилювача П, на

вхід якого подається алгебраїчна сума сигналу завдання та усіх зворотних зв'язків. Вихідний сигнал Π залежить відразу від декількох змінних, що робить практично неможливим регулювання будь-якої змінної незалежно від інших.

Для розподілу дії зворотних зв'язків застосовують відсічки (БН1, БН2). Але і тоді єдиний сигнал завдання не визначає заданого значення змінної, яка вибирається для регулювання. Надання системі потрібних динамічних властивостей досягається за рахунок застосування складних корегувальних пристроїв БК1 та БК2. При цьому неможливо здійснити незалежне налагодження якості регулювання усіх змінних. Тому отримати потрібну високу або оптимальну якість регулювання в цих системах дуже важко, а іноді і не можливо. Але незважаючи на недоліки, ці системи поширені через простоту реалізації або у випадках, коли не пред'являються жорсткі вимоги до якості перехідних процесів та не потрібне роздільне регулювання змінних, або коли відносно простими засобами вдається досягнути потрібної якості процесів.

Із появою інтегральних операційних підсилювачів та тиристорних перетворювачів стало можливим будувати системи підпорядкованого керування з послідовною корекцією (рис. 3.1,б). На операційні підсилювачі покладають функції не тільки підсумовування, підсилення сигналів, але і виконання деяких інших математичних операцій над сигналами, тому їх називають регуляторами.

Найбільш поширені два типи регуляторів: пропорційний (П-регулятор) (рис. 3.2, а) та пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) (рис. 3.2, б).

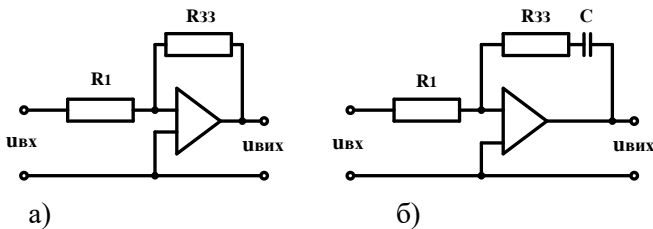


Рисунок 3.2 – Пропорційний (а) та пропорційно-інтегральний (б) регулятори

Слід відмітити, що сигнал на виході ПІ-регулятора перестане змінюватись у часі та буде зберігати деяке постійне значення тільки у

разі $u_{вих} = 0$. Якщо на вході регулятора діє різниця сигналу завдання та сигналу зворотного зв'язку, то в усталеному режимі ці сигнали рівні, що відповідає принципу астатичного регулювання.

Система підпорядкованого керування (рис. 3.1,б) складається із контурів, число яких дорівнює числу регульованих змінних або числу великих сталих часу системи, які підлягають компенсації. Кожний внутрішній контур регулювання підпорядкований наступному за порядком зовнішньому контуру. Ця підпорядкованість виявляється в тому, що задане значення регульованої змінної будь-якого внутрішнього контуру визначається вихідним сигналом регулятора наступного за порядком контуру. Кожний контур будується за принципом регулювання за відхиленням, має свій зворотний зв'язок та регулятор. Для кожного зовнішнього контуру внутрішній контур входить у склад об'єкту регулювання.

У системі підпорядкованого керування з'являється можливість роздільного регулювання змінних та роздільного налагодження контурів й корекції перехідних процесів у кожному контурі, що суттєво спрощує розрахункову роботу, технічну реалізацію та практичне налагодження системи.

Налагодження контуру здійснюють так, щоб отримати технічно оптимальний перехідний процес, при якому час зміни регульованої величини від нуля до усталеного значення був мінімально можливим при пере регулюванні $\sigma \approx (4...10)\%$.

3.2 Системи керування двигунами постійного струму

У замкнених системах автоматичного керування, де двигун живиться від керованого перетворювача, введенням зворотних зв'язків можна отримати жорсткі механічні характеристики у статичі та сформувані необхідну якість перехідних режимів при пуску, гальмуванні та реверсуванні.

Для керування ДПС середньої та великої потужності використовують тиристорні перетворювачі (ТП), які виконані за трифазною мостовою схемою. Нульові схеми ТП використовуються в приводах невеликої потужності з напругою 115 та 220 В.

Найбільш поширена трифазна мостова схема, оскільки вона володіє кращими енергетичними показниками, кращим використанням живлячих трансформаторів. У деяких випадках залежно від номінальної напруги двигуна можна трансформатор замінити струмообмежувальними реакторами.

Для приводу механізмів різних металообробних верстатів, які потребують регулювання швидкості в діапазоні 1000:1 при потужності до 11 кВт, використовується схема серійного електроприводу типу ЕТЗР (рис. 3.3).

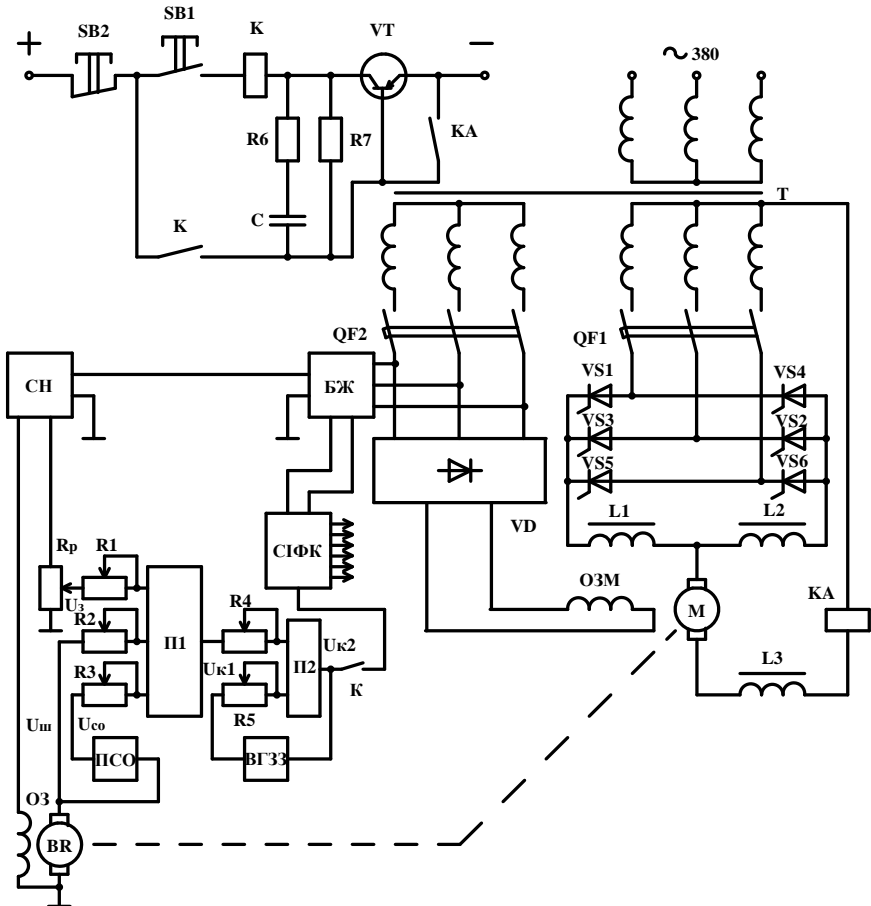


Рисунок 3.3 – Схема серійного тиристорного електроприводу типу ЕТЗР

Електропривод виконаний у вигляді замкненої системи регулювання з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю, яка забезпечує відносний перепад швидкості у межах (0,5...10)% при зміні моменту навантаження від $0,1M_H$ до M_H . В електроприводі забезпечується також обмеження струму за допомогою пристрою

струмообмеження ПСО. Для забезпечення стійкості та необхідної якості перехідних процесів в схемі застосовані гнучкі зворотні зв'язки за швидкістю ДПС й результуючому сигналу керування U_{K2} .

У схемі використовуються ДПС серій ПБСТ, 2П або ПГТ з вбудованим тахогенератором BR.

Тиристри VS1-VS6 утворюють реверсивний перетворювач з двома комплектами тиристорів, які складають випрямну та інверторну групи. Керування групами здійснюється з використанням узгодженого спільного принципу.

Керування тиристорами VS1-VS6 здійснюється трансформаторною системою імпульсно-фазового керування СІФК, яка працює за вертикальним принципом. СІФК має три канали, кожний із яких працює на два тиристри, що включені в одну фазу.

Живлення електроприводу здійснюється від трифазного трансформатора Т з двома вторинними обмотками. Випрямляч VD живить обмотку збудження ОЗМ двигуна М. Блок живлення БЖ живить стабілізатор напруги СН та СІФК.

У склад схеми керування електроприводом входять проміжний підсилювач П1, підсилювач потужності П2, пристрій струмообмеження ПСО, вузол гнучкого зворотного зв'язку ВГЗЗ, потенціометр завдання R_p , кнопки SB1, SB2 та пускове реле К.

Струмове реле КА забезпечує максимальний струмовий захист ДПС. При його спрацюванні вимикається реле К, з тиристорів знімаються сигнали керування й ДПС відключається від джерела живлення. Автоматичні вимикачі QF1 та QF2 здійснюють максимальний струмовий захист силової частини ТП, ОЗМ двигуна та схеми керування. Схема електроприводу з тиристорним перетворювачем та використанням мікропроцесора для регулювання положення виконавчого органу робототехнічного пристрою наведена на рисунку 3.4.

Ця схема є цифро-аналоговою, оскільки містить як аналогові, так і цифрові вузли та пристрої керування. Вона поєднує кращі властивості обох видів пристроїв керування.

Схема керування електроприводом побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат.

Регулювання струму здійснюється аналоговим ПІ-регулятором струму РС, на вхід якого надходять сигнали зворотного зв'язку за струмом від давача струму ДС та завдання струму U_{3C} з виходу регулятора швидкості РШ.

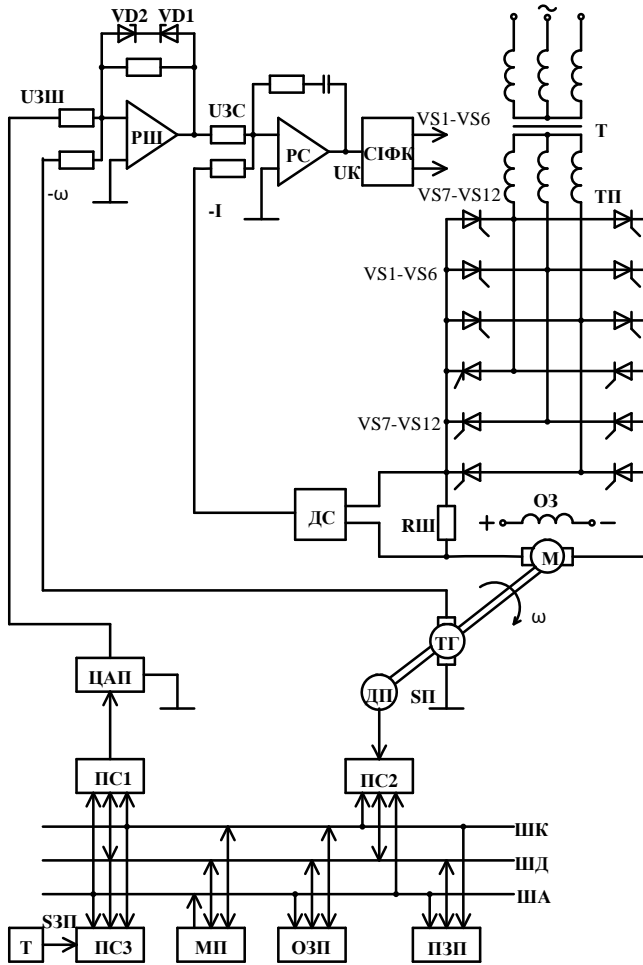


Рисунок 3.4 – Схема електроприводу з тиристорним перетворювачем та використанням мікропроцесора для регулювання положення виконавчого органу робототехнічного пристрою

Аналоговий П-регулятор швидкості РШ формує $U_{3ш}$ на основі сигналу $U_{3с}$ та сигналу зворотного зв'язку за швидкістю від тахогенератора ТГ. Стабілітрони VD1 та VD2 обмежують сигнал на виході РШ, що забезпечує обмеження струму й моменту M .

Регулювання положення здійснюється за допомогою мікропроцесорної системи, яка містить мікропроцесор МП,

оперативний ОЗП та постійний запам'ятовуючи пристрої ПЗП, пристрої спряження ПС1-ПС3, цифровий давач положення ДП й цифро-аналоговий перетворювач ЦАП. Сигнал завдання положення $S_{3П}$ надходить з терміналу Т.

Принцип роботи регулятора положення заснований на обчисленні моменту початку гальмування електроприводу.

При відомих швидкості $\omega_{УСТ}$ та прискоренні електроприводу $a = (M - M_C) / J_{\Sigma}$ розраховується час $t_{Г}$ й шлях $S_{Г}$ на ділянці гальмування електроприводу наприкінці відробки переміщення $S_{3П}$ за формулами:

$$t_{Г} = \frac{\omega_{УСТ}}{a} ; S_{Г} = \frac{\omega_{УСТ}^2}{2a} .$$

Прогресивним явищем при створенні засобів керування та автоматизації технологічних процесів є розробка та випуск комплектних електроприводів (КЕП). КЕП – це регульований електропривод, який містить всі необхідні функціональні елементи, що узгоджені за всіма своїми технічними та конструктивними характеристиками й параметрами.

Поширення КЕП у різних галузях промисловості зумовлено меншою трудомісткістю при його розробці та виготовленні, скороченням часу на електромонтажні й налагоджувальні роботи, а також зручністю в експлуатації.

До складу КЕП постійного струму входять: двигун постійного струму з тахогенератором й відцентровим вимикачем; тиристорний перетворювач для живлення обмоток збудження та якоря двигуна; силовий трансформатор або реактор; згладжувальний реактор; комутаційна і захисна апаратура; пристрій динамічного гальмування; схема керування електроприводом; блоки живлення обмотки збудження тахогенератора та електромагнітного гальма; шафа високовольтного вводу й комплект апаратів, приладів, пристроїв для керування та контролю стану електроприводу.

Давачі технологічних параметрів роботи машин і механізмів, а також керуючі та сигнальні пристрої, що змонтовані на пультах керування, через їх специфічність в комплект поставки звичайно не входять.

КЕП серій ЕКТ та КТЕ потужністю відповідно до 2000 й 1000 кВт мають майже такі ж самі функціональні можливості, але відрізняються набором та виконанням окремих елементів.

Велика група КЕП розроблена для приводу механізмів верстатів, роботів та маніпуляторів. До їхнього числа відносяться КЕП серій ЕТУ3601, ЕТ3, ЕТ6, ЕТРП, ЕП1, ЕПУ2, ПРП, де застосовуються високомоментні двигуни типів ПБСТ, ПГТ, 2П, ПБВ, ДК1 із вбудованими тахогенераторами. Деякі з них (ЕТУ 3601, ЕТ3) мають блоки зв'язку з системами числового програмного керування.

3.3 Системи частотного керування асинхронним двигуном

Прикладом систем частотного керування асинхронним двигуном можуть слугувати електроприводи серії ЕКТ та ЕКТ2. Ці електроприводи забезпечують регулювання швидкості, струму та моменту трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором за рахунок зміни частоти та величини підведеної до них напруги. Спрощена функціональна схема електроприводу наведена на рисунку 3.5.

В якості силового перетворювача в електроприводі використовується тиристорний перетворювач частоти ТПЧ з проміжною ланкою постійного струму. ТПЧ складається із керованого випрямляча КВ та інвертора напруги ІН зі своїми схемами керування СКВ та СКІ. Між КВ та ІН включений силовий фільтр Ф, який забезпечує фільтрування та циркуляцію реактивної потужності у силовій частині схеми.

Схема керування електроприводом побудована за принципом підпорядкованого керування координат і має два контури – внутрішній (струму) та зовнішній (напруги). Регулювання координат здійснюється ПІ-регуляторами струму РС та напруги РН за сигналами від давачів струму ДС й напруги ДН. При частотах нижче за $f_{НОМ}$

схема керування підтримує відношення $\frac{U_2}{f_2}$ постійним, а при частотах

вище за $f_{НОМ}$ напруга U_2 залишається незмінною, що забезпечується підсилювачем-обмежувачем ПО.

ТПЧ забезпечує робочі діапазони зміни частоти (5...80) Гц при $f_{НОМ} = 50$ Гц та (15...240) Гц при $f_{НОМ} = 200$ Гц. Діапазон регулювання напруги складає (0...380) В. Серія ЕКТ2 випускається на

потужності від 16,5 до 263,5 кВт. Коефіцієнт корисної дії лежить у межах (85...96)%.

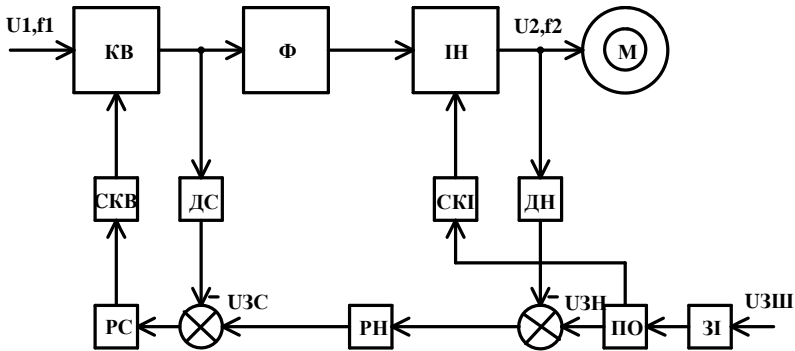


Рисунок 3.5 – Функціональна схема частотного керування асинхронним двигуном

У схемі ЕКТ передбачені також захисти від короткого замикання, від зниження напруги живлення нижче $0,85U_{НОМ}$, від перевантаження, від обриву фази та припинення примусової вентиляції тиристорів.

3.4 Система керування асинхронно-вентильним каскадом

На рисунку 3.6 наведена схема двоконтурної системи керування асинхронно-вентильним каскадом АВК з підпорядкованим регулюванням координат.

Зовнішньому контуру регулювання швидкості РШ підпорядкований внутрішній контур регулювання випрямленого струму РС. Напругою завдання для РС є вихідна напруга РШ.

Схема містить: задавач інтенсивності ЗІ, фільтр С1, R1, R2, який забезпечує налагодження РШ на технічний оптимум, ПІ-регулятори швидкості РШ та струму РС, блоки обмеження БО, систему імпульсно-фазового керування тиристорами СІФК та інвертор І.

Оскільки АВК не є повністю керованим електроприводом (випрямлений струм не може змінити свій напрямок), РШ та РС повинні мати двобічне несиметричне обмеження за рахунок діодів VD1 й VD2. Ці діоди виключають появу на виходах регуляторів

напруги іншої полярності ніж тої, яка наведена на рис. 3.5. БО обмежують максимальні рівні сигналів на виходах регуляторів.

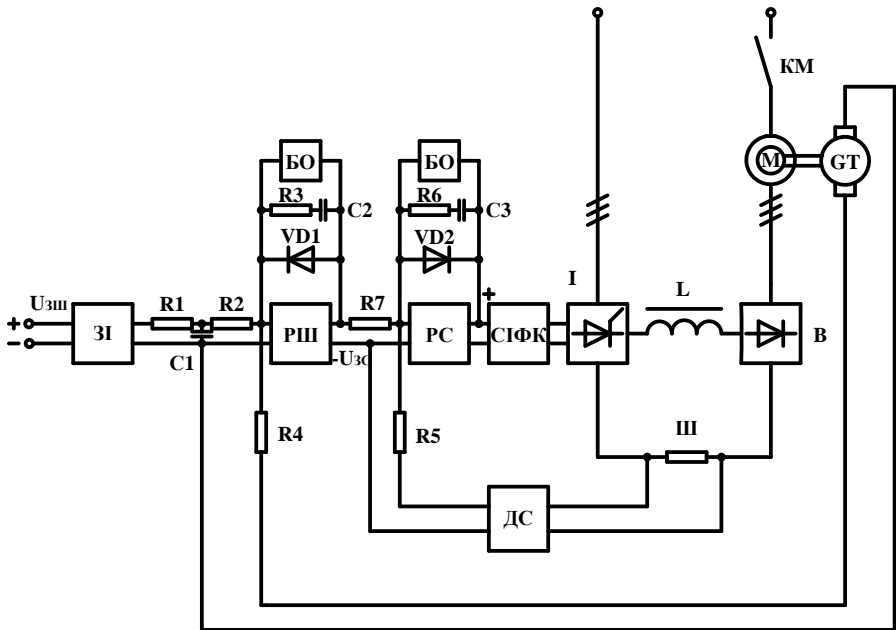


Рисунок 3.6 – Схема двоконтурної системи керування асинхронно-вентильним каскадом АВК з підпорядкованим регулюванням координат

Гальмування електроприводу здійснюється шляхом подачі постійного струму в обмотку статора двигуна М. При динамічному гальмуванні потужність ковзання віддається у мережу через інвертор І. Керування процесом гальмування можна перенести у коло ротора шляхом зміни кута керування тиристорів інвертора.

3.5 Керування електроприводами з вентильними двигунами

Вентильний двигун (ВД) складається із синхронного двигуна та перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму (випрямляч – інвертор), вентилі інвертора якого комутуються у функції положення ротора. Інвертор виконує роль колектора, а синхронний двигун – роль машини постійного струму та називається безколекторною машиною постійного струму (БМПС) або ВД постійного струму.

ВД доцільно подати у вигляді керованого випрямляча та БМПС із системою підпорядкованого керування, яка містить контур струму й контур швидкості. При налагодженні регуляторів системи треба враховувати залежність параметрів БМПС від кута випередження β інвертора, швидкості та значної реакції якоря. У якості інвертора, особливо за наявності контуру струму, доцільно використовувати інвертор струму (ІС).

У ВД середньої та великої потужності часто використовують синхронні двигуни звичайної конструкції й природну комутацію вентилів ІС у функції напруги статора двигуна. Для забезпечення стійкої комутації ІС та усунення реакції якоря систему керування швидкістю й струму якоря слід доповнити системою автоматичного регулювання збудження. ВД на базі синхронних двигунів звичайної конструкції застосовують в електроприводах з тривалим навантаженням, яке мало або повільно змінюється.

Для ВД створюються синхронні двигуни спеціальних конструкцій з розташованими на валу двигунів давачами положення ротора. Із ВД постійного струму спеціальних конструкцій викликають інтерес безконтактні синхронні двигуни (БСД).

У БСД з активним ротором магнітний потік створюється за допомогою постійних магнітів. БСД виконуються на потужність до 30 кВт, з максимальною частотою обертання до 3000 об/хв та багатополюсними (до 12 й більше полюсів).

На рисунку 3.7 наведена принципова схема силової частини приводу та структурна схема автоматичного керування БСД.

Керування автономним інвертором струму АІС здійснюється системою керування інвертором СКІ, яка синхронізована давачем положення ротора ДПР, розташованим на валу двигуна М.

Система керування електроприводом побудована за принципом підпорядкованого керування з послідовною корекцією та містить контур струму з регулятором струму РС із зворотним зв'язком за струмом й контур швидкості з регулятором швидкості РШ із зворотним зв'язком за швидкістю. РС діє на систему керування вентилями СКВ, змінюючи струм та напругу на вході АІС. Діапазон регулювання швидкості в системі до 100:1.

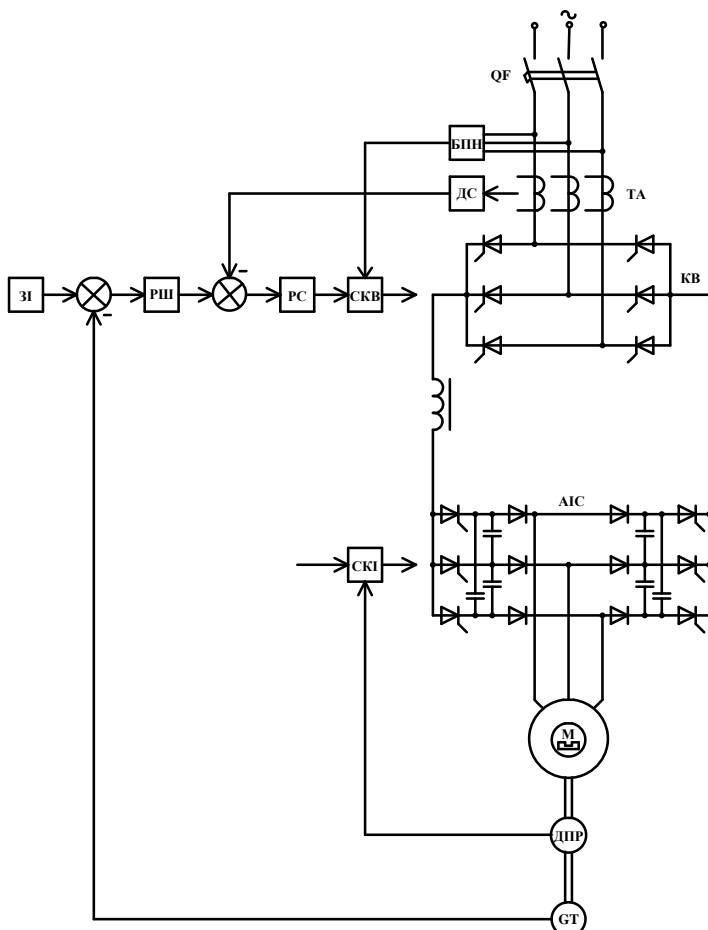


Рисунок 3.7 – Принципова схема БСД

4 СЛІДКУЮЧИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

4.1 Призначення та класифікація стежних електроприводів

Стежний електропривод – це замкнена автоматична система, за допомогою якої виконавчий орган із певною точністю відробляє рух робочого механізму у відповідності з довільним сигналом від давача. Стежний електропривод застосовується для антен радіотелескопів, систем супутникового зв'язку, в металорізальних верстатах, для приводку роботів та маніпуляторів, в автоматичних вимірювальних пристроях і т.п.

У загальному випадку стежний електропривод складається з давача 1, приймального пристрою 2, підсилювача 3 та виконавчого електродвигуна 4 (рис. 4.1). Давач та приймач утворюють вимірювач неузгодження. Стежний електропривод працює тільки за рахунок кута неузгодження між висями давача та приводного механізму.

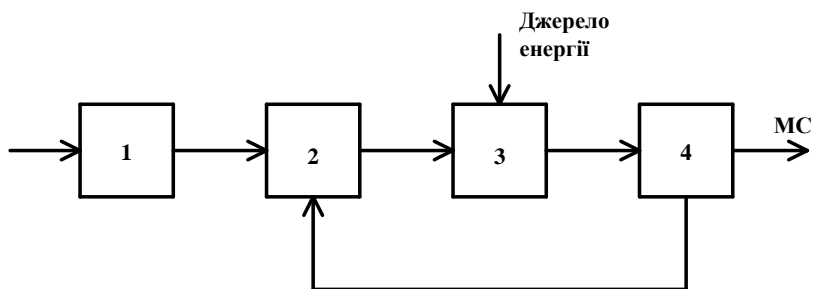


Рисунок 4.1 – Функціональна схема слідкуючого електроприводу

Процес роботи стежного електроприводу полягає у неперервному автоматичному усуванні неузгодження, що виникає.

Класифікація стежного електроприводу може бути виконана за різними ознаками. Коли стежний електропривод призначений для відтворення з певною точністю швидкості руху виконавчого органу, то він називається швидкісним, а якщо положення – позиційним.

Розрізняють стежні електроприводи з неперервним та перервним керуванням. Останні, у свою чергу, поділяються на релейні та імпульсні.

У стежних електроприводах неперервної дії напруга, яка пропорційна сигналу неузгодження, постійно подається на електродвигун.

Стежний електропривод релейної дії характеризується тим, що напруга на електродвигун подається тільки у разі, коли сигнал неузгодження досягає певного значення, тобто коли він виходить за межі зони нечутливості.

Імпульсний стежний електропривод відрізняється тим, що керуюча дія на електродвигун подається у вигляді імпульсів напруги, амплітуди, частоти або заповнення якої змінюється залежно від сигналу неузгодження.

До основних технічних вимог, яким повинні задовольняти стежні електроприводи, відносяться висока точність обробки заданої величини, стійка робота електроприводу в широкому діапазоні швидкостей, невеликий час перехідного процесу, а також простота та надійність в експлуатації.

Кут неузгодження у перехідних режимах не має перевищувати заданого, а коливання системи повинні мати затухаючий характер.

4.2 Слідкуючий електропривод релейної дії

Функціональна схема електроприводу релейної дії наведена на рисунку 4.2.

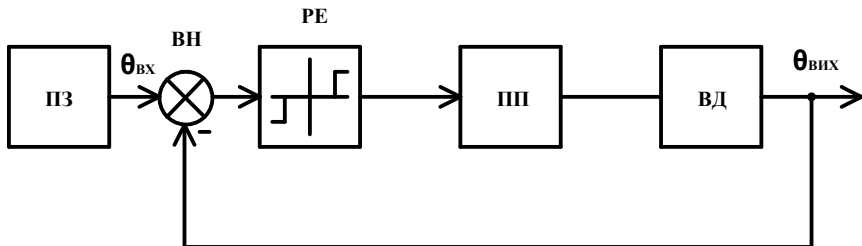


Рисунок 4.2 – Функціональна схема електроприводу релейної дії

Електропривод містить пристрій завдання ПЗ, вимірювач неузгодження кутового положення валів ВН, релейний елемент РЕ, підсилювач потужності ПП та виконавчий двигун ВД. Коли різниця $\theta_{вх} - \theta_{вих}$ виходить за межі зони нечутливості РЕ, виконавчий двигун вмикається та усуває неузгодження.

Основною особливістю електроприводу релейної дії є наявність автоколивань в електромеханічній системі електроприводу при зміні вхідних сигналів. Ці коливання призводять до великих втрат потужності в якорі при використанні двигунів постійного струму з незалежним збудженням. Тому перевага віддається двигунам

постійного струму з послідовним збудженням, в яких не виникає додаткових втрат та які мають великі пускові моменти.

На рисунку 4.3 наведена схема стежного електроприводу релейної дії невеликої потужності з двигуном постійного струму, який має дві послідовні обмотки збудження. Двигун М підключається до джерела живлення за допомогою транзистора $VT1$ або $VT2$, які за відсутності сигналів керування закриті напругою зміщення $U_{ЗМ}$ через резистори $R1$ та $R2$.

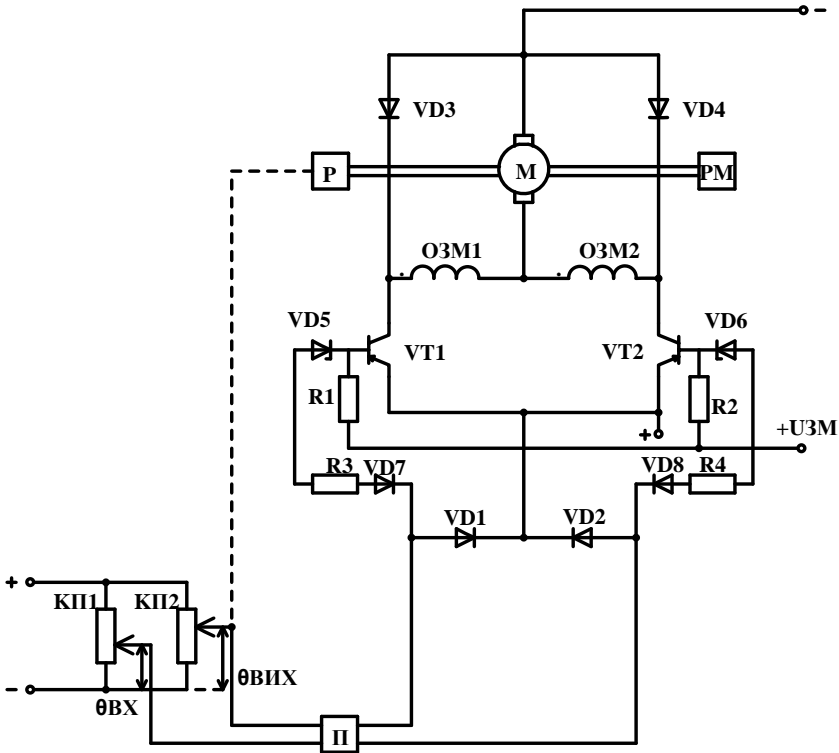


Рисунок 4.3 – Схема стежного електроприводу релейної дії невеликої потужності з двигуном постійного струму, який має дві послідовні обмотки збудження

Для захисту від перенапруги, що виникає при вимкненні обмотки збудження та обмотки якоря, останні шунтовані діодами $VD3$ й $VD4$. Коли відкритий транзистор $VT1$, то двигун М обертається в одному напрямку, коли - $VT2$, то в іншому напрямку. Це відбувається

за рахунок зміни напрямку магнітного потоку при незмінному напрямку струму якоря.

Електропривод у схемі на рис. 4.3 відробляє задане переміщення з певною похибкою, яка зумовлена нечутливістю системи, що виникає через наявність порогу спрацювання стабілітронів $VD5$ та $VD6$. Зону нечутливості системи намагаються зробити якомога меншою. Однак зниження величини зони нечутливості може призвести до виникнення небажаного коливального режиму роботи електроприводу біля положення рівноваги. Ефективним засобом боротьби з цим режимом є введення в систему додаткових сигналів за першою та другою похідних від сигналу неузгодження, а також застосування електричного гальмування після вимкнення електродвигуна.

Перевагами стежних електроприводів релейної дії є їх простота, надійність та можливість отримання оптимальних траєкторій руху виконавчих органів робочої машини. До недоліків слід віднести їх схильність до коливань та наявність певної нечутливості при стеженні.

4.3 Слідкуючий електропривод неперервної дії

Функціональна схема електроприводу неперервної дії наведена на рисунку 4.4.

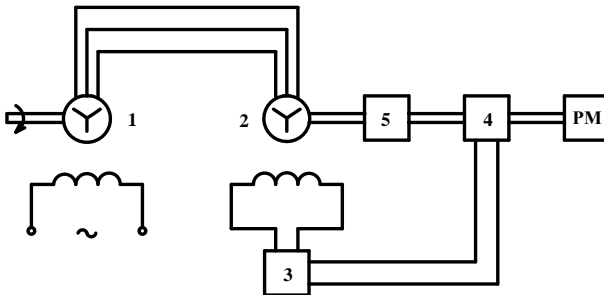


Рисунок 4.4 – Функціональна схема електроприводу неперервної дії

Електропривод складається з давача 1 й приймача 2, які утворюють вимірювач неузгодження, підсилювача 3 й виконавчого двигуна 4, який механічно зв'язаний з робочою машиною РМ та приймачем 2 через передачу 5. В якості давача та приймача частіше всього використовуються сельсини або поворотні трансформатори, які працюють у трансформаторному режимі.

При повороті ротора давача 1 в однофазній обмотці сельсина-приймача 2 наводиться ЕРС, яка діє на підсилювач 3, котрий

забезпечує при цьому вмикання двигуна та його роботу з певною швидкістю. Двигун 4 приводить у дію РМ та одночасно через передачу 5 – ротор сельсина-приймача 2. При повороті ротора сельсина 2 на певний кут усувається неузгодження у положеннях роторів давача та приймача й припиняється робота двигуна 4.

4.4 Схеми слідкуючих електроприводів з неперервним керуванням

Основною перевагою стежного електроприводу з виконавчим двигуном постійного струму та силовим транзисторним підсилювачем є значна швидкодія, яка дозволяє надати електроприводу потрібні динамічні властивості. Крім того, зменшуються маса та габарити електроприводу, підвищується коефіцієнт корисної дії, знижується рівень шуму, а також підвищується надійність.

Схема стежного електроприводу з силовим транзисторним підсилювачем наведена на рисунку 4.5.

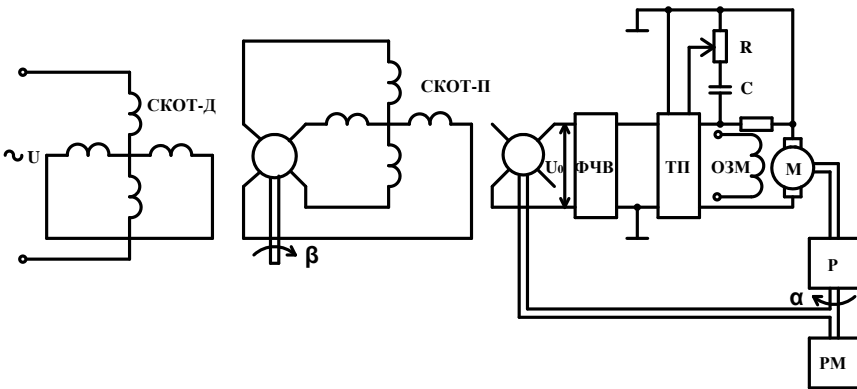


Рисунок 4.5 – Схема слідкуючого електроприводу з силовим транзисторним підсилювачем

Вимірювальна схема для отримання сигналу неузгодження побудована з використанням двох синусно-косинусних обертових трансформаторів СКОТ. Точність вимірювання кута неузгодження у цих стежних електроприводах складає 1...3 секунди.

СКОТ має на статорі та на роторі два взаємно ортогональних обмотки. При повороті ротора давача СКОТ-Д відносно його обмотки збудження в обмотках ротора наводиться змінна ЕРС, амплітуда якої пропорційна $\cos \beta$ в одній обмотці та $\sin \beta$ – в іншій.

5 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

5.1 Завдання до виконання

ЗАВДАННЯ №1

Скласти схему релейно-контактного керування електроприводом технологічної установки та дати стислий опис її роботи. Схема має забезпечити захист від короткого замикання, перевантаження та зниження напруги живлення.

Інші умови за варіантом подані в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Варіанти завдань

Варіант	Тип приводу	Тип двигуна	Пуск у 2 ступеня в функції	Гальмування
0	Р	ДПС з НЗ	ЕРС	Противмиканням в функції ЕРС
1	НР	ДПС з ПЗ	часу	Динамічне в функції ЕРС
2	Р	АД з ФР	часу	Противмиканням в функції ЕРС
3	НР	ДПС з НЗ	ЕРС	Динамічне в функції часу
4	Р	ДПС з ПЗ	часу	Противмиканням в функції ЕРС
5	НР	АД з ФР	часу	Динамічне в функції часу
6	Р	ДПС з НЗ	струму	Противмиканням в функції ЕРС
7	НР	ДПС з ПЗ	ЕРС	Динамічне в функції часу
8	Р	АД з ФР	струму	Противмиканням в функції ЕРС
9	НР	ДПС з НЗ	струму	Динамічне в функції часу
10	Р	ДПС з ПЗ	ЕРС	Противмиканням в функції ЕРС
11	НР	АД з ФР	струму	Динамічне в функції швидкості
12	Р	ДПС з НЗ	часу	Противмиканням в функції ЕРС
13	НР	ДПС з ПЗ	струму	Динамічне в функції часу
14	Р	АД з ФР	часу	Противмиканням в функції ЕРС
15	НР	ДПС з НЗ	часу	Динамічне в функції ЕРС
16	Р	ДПС з ПЗ	струму	Противмиканням в функції ЕРС
17	НР	АД з ФР	струму	Динамічне в функції часу
18	Р	ДПС з НЗ	ЕРС	Противмиканням в функції ЕРС
19	НР	ДПС з ПЗ	часу	Динамічне в функції часу

Позначення: Р – реверсивний, НР – неревверсивний, ДПС з НЗ – двигун постійного струму з незалежним збудженням, ДПС з ПЗ – двигун постійного струму з послідовним збудженням, АД з ФР – асинхронний двигун з фазним ротором.

ЗАВДАННЯ №2

Розрахувати та побудувати електромеханічну характеристику двигуна в системі комплектний тиристорний привод серії КПТ – двигун постійного струму з лінійним від’ємним зворотним зв’язком за швидкістю при введенні до неї від’ємного зв’язку за струмом з відсічкою та обмеження вхідного сигналу. У зоні дії струмової відсічки струм двигуна має утримуватись у межах $(1,5...2)I_n$, де I_n – номінальний струм двигуна.

Система має забезпечити перепад швидкості не вище $(N \text{ варіанту})\%$ при зміні навантаження від $0,25I_n$ до I_n у діапазоні регулювання швидкості $D = K_3$.

Тип двигуна, перетворювача та трансформатора наведені в таблиці 5.3. Технічні дані електродвигунів постійного струму серії П наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.3 – Варіанти завдань

Варіанти	Тип двигуна	Тип перетворювача	Тип трансформатора	r_T , Ом	x_T , Ом
0,10	П52	КПТ-230/40-ТН	ТСТО-230/40-Н1	0,32	0,023
1,11	П61	КПТ-230/40-ТН	ТСТО-230/40-Н1	0,32	0,023
2,12	П62	КПТ-230/63-ТМ	ТСТО-230/63-М1	0,065	0,059
3,13	П71	КПТ-230/63-ТН	ТСТО-230/63-Н1	0,14	0,04
4,14	П72	КПТ-230/100-ТМ	ТСТО-230/100-М1	0,023	0,065
5,15	П81	КПТ-230/160-ТН	ТСТО-230/160-Н1	0,054	0,017
6,16	П82	КПТ-230/160-ТН	ТСТО-230/160-Н1	0,054	0,017
7,17	П91	КПТ-230/250-ТМ	ТСТО-230/250-М1	0,014	0,05
8,18	П92	КПТ-230/250-ТН	ТСТО-230/250-Н1	0,02	0,01
9,1 9	П1 01	КПТ- 230/320-ТМ	ТСТО- 230/320-М1	,007	,031

Позначення: K_3 – остання цифра шифру залікової книжки.

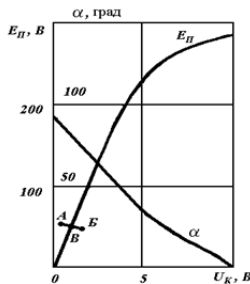


Рисунок 5.1 – Характеристики перетворювача

Таблиця 5.4 – Технічні дані електродвигунів постійного струму серії П 220В, 1000 об/хв, $2p=4$, $2a=2$, загальнопромислового застосування

Тип	P_n , кВт	I_n , А	$R_{я}$, Ом	$R_{\partial.n}$, Ом	J , кгм ²
П52	4,5	25,2	0,432	0,158	0,1
П61	6	32,6	0,32	0,150	0,14
П62	8	43	0,226	0,102	0,18
П71	11	63	0,224	0,076	0,35
П72	14	78	0,172	0,0655	0,4
П81	19	105	0,11	0,0345	0,7
П82	25	133	0,0806	0,0318	0,8
П91	32	171	0,0503	0,0163	1,4
П92	42	219	0,0402	0,0145	2,0
П101	55	286	0,0206	0,00858	2,5

5.2 Приклади розрахунку

Приклад розрахунку завдання 1

Скласти схему релейно-контактного керування електроприводом технологічної установки та дати стислий опис її роботи. Схема має забезпечити захист від короткого замикання, перевантаження та зниження напруги живлення.

Варіант	Тип приводу	Тип двигуна	Пуск у 2 ступеня в функції	Гальмування
1	Реверсивний	ДПС з НЗ	ЕРС	Противмиканням в функції ЕРС

Розв'язок.

Схема релейно-контактного керування електроприводом ТУ наведена на рисунку 5.2. Схема забезпечує:

- захист від КЗ за допомогою автоматичного вимикача QF ;
- захист від перевантаження за допомогою теплових реле KK ;
- захист від зниження напруги за допомогою реле напруги KV .

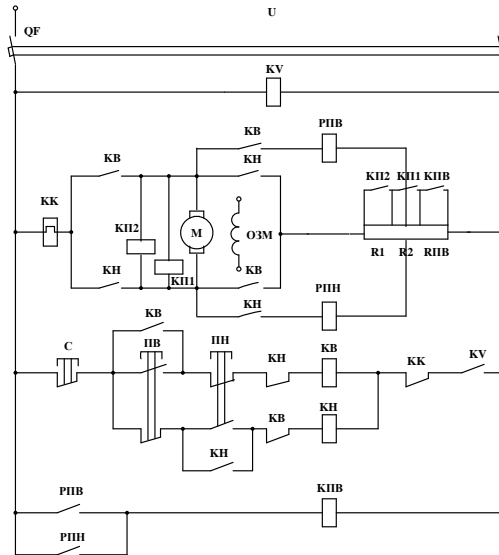


Рисунок 5.2 – Схема релейно-контактного керування електроприводом технологічної установки

Пуск двигуна в напрямку «Вперед» здійснюється кнопкою *ПВ*. При цьому спрацьовує контактор *КВ*, який переходить на саможивлення, підключає якор двигуна через пусковий резистор до мережі, замикає свій контакт у колі реле *РПВ* і розмикає свій контакт у колі контактора *КН*. Від спаду напруги спрацьовує реле *РПВ*, яке замикає свій контакт у колі контактора *КПВ*. Контактор *КПВ* спрацює й зашунтує опір $R_{ПВ}$. Двигун почне розганятись і його ЕРС буде збільшуватись. При певному значенні ЕРС спрацює контактор прискорення *КПН*. Він зашунтує опір R_1 пускового резистора. Після кидка струму двигун продовжує розганятись. Коли ЕРС на затискачах двигуна буде дорівнювати напрузі спрацювання контактора *КП2*, він спрацює й зашунтує опір R_2 пускового резистора. Двигун виходить на природну характеристику.

Реверсування двигуна здійснюється кнопкою *ПН*. Контактор *КВ* вимикається та відключає якор двигуна від мережі. Одночасно вимикається контактор *КПВ*, тому на час гальмування у коло якоря двигуна вводиться опір $R_{ПВ}$. Далі вмикається контактор *КН*. Коли швидкість двигуна стає $\omega \approx 0$, то спрацьовує реле *РПН*, яке замикає

Опір силового кола ТП:

$$R_{II} = r_T + \frac{mx_T}{2\pi} = 0,32 + \frac{3 \cdot 0,023}{2\pi} = 0,331 \text{ Ом.}$$

$$R_d = 1,2(R_{II} + R_{III}) = 1,2(0,32 + 0,15) = 0,564 \text{ Ом.}$$

Опір кола ТП-ДПС:

$$R = 1,02(R_{II} + R_d) = 1,02(0,331 + 0,564) = 0,913 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт передачі двигуна:

$$K_d = \frac{\omega_H}{U_H - I_H R_d} = \frac{104,7}{220 - 32,6 \cdot 0,564} = 0,519 B^{-1} c^{-1}.$$

Спад напруги в якірному колі, який не залежить від струму:

$$\Delta U = \Delta U_B + \Delta U_{II} = 0,75 + 2 = 2,75 B.$$

ЕРС перетворювача при $\omega = \omega_{\min}$ та $I = I_H$:

$$E_{II} = \frac{\omega_H}{DK_d} + I_H R + \Delta U = \frac{104,7}{1 \cdot 0,519} + 32,6 \cdot 0,913 + 2,75 = 234,2 B.$$

Напруга керування перетворювача:

$$U_K = \frac{E_{II}}{K_{II}} = \frac{234,2}{51,5} = 4,55 B.$$

Заданий перепад швидкості при $I = I_H$:

$$\Delta \omega_3 = \frac{\omega_H}{D} \cdot \frac{\delta_3}{1 - \delta_3} = \frac{104,7 \cdot 0,01}{(1 - 0,01)} = 1,06 c^{-1}.$$

Перепад швидкості у розімкненій системі:

$$\Delta \omega_p = I_H R K_d = 32,6 \cdot 0,913 \cdot 0,519 = 15,45 c^{-1}.$$

Потрібний коефіцієнт передачі зворотного зв'язку:

$$K_\omega = \frac{\Delta \omega_p - \Delta \omega_3}{\Delta \omega_3 K_{II} K_d} = \frac{15,45 - 1,06}{1,06 \cdot 51,5 \cdot 0,519} = 0,508 B \cdot c.$$

Вибираємо тахогенератор ТД-102: $n_{TH} = 1500 \text{ об/хв}$,

$$K_\omega = 0,8 B \cdot c.$$

Мінімальна напруга завдання:

$$U_3 = \frac{\omega_0}{K_{II} K_d} (1 + K_\omega K_d K_{II}) + \frac{\Delta U}{K_{II}} = \frac{105,8}{51,5 \cdot 0,519} (1 + 0,8 \cdot 0,519 \cdot 51,5) + \frac{2,75}{51,5} = 88,7 B,$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{\omega_H}{D} \frac{1}{1 - \delta_3} = \frac{104,7}{(1 - 0,01)} = 105,8 c^{-1}.$$

Струм відсічки та короткого замикання

$$I_{ВД} = 1,5I_H = 1,5 \cdot 32,6 = 48,9 \text{ A},$$

$$I_{КЗ} = 2I_H = 2 \cdot 32,6 = 65,2 \text{ A}.$$

ЕРС перетворювача в режимі короткого замикання:

$$E_{ПКЗ} = I_{КЗ}R + \Delta U = 65,2 \cdot 0,913 + 2,75 = 62,28 \text{ В}$$

Напряга керування перетворювача в режимі короткого замикання:

$$U_{ККЗ} = \frac{E_{ПКЗ}}{K_{\Pi}} = \frac{62,28}{51,5} = 1,21 \text{ В}.$$

Напрягу $U'_{КГРАН}$ беремо рівною 68 В для стабілітрона КС568В.

Коефіцієнт струмової відсічки:

$$K_{СВ} = \frac{U'_{КГРАН} - U_{ККЗ}}{(I_{КЗ} - I_{ВД})R} = \frac{68 - 1,21}{(65,2 - 48,9) \cdot 0,913} = 4,488.$$

Напряга пробною стабілітрона 2СТ:

$$U_{2СТ} = K_{СВ}I_{ВД}R = 4,488 \cdot 48,9 \cdot 0,913 = 200,4 \text{ В}.$$

Струм двигуна на 3 ділянці:

$$I = \frac{U_K - U_3 - U_{2СТ}}{-K_{СВ}R} = \frac{U_K - 68 - 200,4}{-4,488 \cdot 0,913} = \frac{268,4 - U_K}{4,0975}.$$

Струм двигуна на 2 ділянці:

$$I = \frac{U_K - U_3 + K_{\omega}K_D(E_{\Pi} - \Delta U) - U_{2СТ}}{(K_{\omega}K_D - K_{СВ})R} = \frac{U_K - 88,7 + 0,8 \cdot 0,519(E_{\Pi} - 2,75) - 200,4}{(0,8 \cdot 0,519 - 4,488) \cdot 0,913} =$$

$$= \frac{290,2 - 0,415E_{\Pi} - U_K}{3,7185}.$$

Струм двигуна на 1 ділянці:

$$I = \frac{U_K - U_3 + K_{\omega}K_D(E_{\Pi} - \Delta U)}{K_{\omega}K_D R} = \frac{U_K - 88,7 + 0,8 \cdot 0,519(E_{\Pi} - 2,75)}{0,8 \cdot 0,519 \cdot 0,913} =$$

$$= \frac{-89,8 + 0,415E_{\Pi} + U_K}{0,3791}.$$

Швидкість двигуна:

$$\omega = K_D(E_{\Pi} - \Delta U - RI) = 0,519(E_{\Pi} - 2,75 - 0,913I).$$

Таблиця 5.6 – Результати розрахунку

Ділянка	3	2	1
---------	---	---	---

$U_K, \text{В}$	1,21	1,4	4,55	4,8	4,5	4,8
$I, \text{А}$	65,2	65,1	50,7	49,2	28,7	46,4
$\omega, \text{с}^{-1}$	0	5,16	96,11	103,57	105,26	104,89
$E_T, \text{В}$	62,28	72,1	234,2	247,2	231,75	247,2

За таблицею 5.6 на рисунку 5.5 побудована електромеханічна характеристика електроприводу.

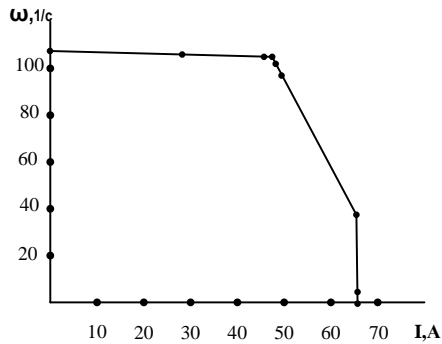


Рисунок 5.5 – Електромеханічна характеристика електроприводу

За даними графіка визначимо розрахунковий перепад швидкості:

$$\delta_p = \frac{38,5 - 36,5}{38,5} \cdot 100\% = 5,2\% < \delta_s = 11\%.$$

Список використаних джерел

1. Безвесільна О.М. Толочко Т.О. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2023, 328 с.
2. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2020, 387 с.
3. Донець О.В. Теорія електропривода. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2021, 148 с.
4. Лавріненко Ю.М. Основи електропривода. К.: Ліра-К. 2021, 532 с.

E50

Електропривід транспортних засобів. Методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 52 с.

Комп'ютерний набір

Віктор ЛИШУК

Редактор

Віктор ЛИШУК

Підп. до друку «__» _____ 2026 р.

Формат 60x84/16. Папір офс.

Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 3,5.

Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції

Луцького національного технічного університету

43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Друк – ВІП Луцького НТУ