

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД
МАШИН ТА УСТАНОВОК**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних
та мехатронних комплексів» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

| | |
|-------------------------|--|
| Автори: | <i>Чермалих Олександр Валентинович, к.т.н., доцент</i> <i>Данілін Олександр Валерійович, к.т.н., доцент</i> <i>Босак Алла Василівна, к.т.н., доцент</i> <i>Торопова Лілія Володимирівна, асистент</i> |
| Рецензент | <i>Побігайло В.А. – к.т.н., доц. кафедри електропостачання НН ІЕЕ, КПІ ім. Ігоря Сікорського</i> |
| Відповідальний редактор | <i>Лебедєв Л.М., канд. техн. наук, доц. автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів НН ІЕЕ, КПІ ім. Ігоря Сікорського</i> |

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 27.01.2022 р.)
за поданням Вченої ради НН ІЕЕ
(протокол № 5 від 29.12.2021 р.)*

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД МАШИН ТА УСТАНОВОК

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Автоматизований електропривод машин та установок: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ О.В. Чермалих, О.В. Данілін, А.В. Босак, Л.В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,09 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 60 с.

В навчальному посібнику викладено принципи побудови систем регульованого електроприводу машин та установок. Наведено методики розрахунку елементів силового ланцюга та систем управління. Дано приклади розрахунків як робочих характеристик машин та установок, що визначають властивості електроприводів, так і статичних та динамічних характеристик регульованих електроприводів. Описано методи та засоби комп'ютерного моделювання електроприводів. Наведено приклади моделювання в пакеті MatLab / Simulink.

Навчальне видання призначене для здобувачів ступеня бакалавр за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів».

© О.В. Чермалих, О.В. Данілін, А.В. Босак, Л.В. Торопова, 2021
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

З М І С Т

| | |
|---|----|
| Розділ 1. Введення в дисципліну | 4 |
| Тема 1.1. Принцип побудови систем автоматизованого електропривода..... | 4 |
| Тема 1.2. Структура систем керування електроприводом | 5 |
| Розділ 2. Типові системи автоматизованого електроприводу | 8 |
| постійного струму | 8 |
| Тема 2.1. Електропривод за системою генератор-двигун Г-Д..... | 8 |
| Тема 2.2. Електропривод за системою ТП-Д..... | 12 |
| Розділ 3. Типові системи автоматизованого електроприводу | 18 |
| змінного струму | 18 |
| Тема 3.1. Електропривод за системою тиристорний регулятор напруги- асинхронний двигун ТРН-АД | 18 |
| Тема 3.2. Електропривод за системою асинхронно - вентильний каскад АВК | 24 |
| Тема 3.3. Електропривод за системою перетворювач частоти - асинхронний двигун ПЧ-АД..... | 29 |
| Розділ 4. Побудова і особливості функціонування систем електропривода машин і установок..... | 35 |
| Тема 4.1. Автоматичне керування електроприводом підйомних машин | 35 |
| Тема 4.2. Автоматичне керування електроприводом конвеєрних установок..... | 50 |
| Тема 4.3. Автоматичне керування електроприводом турбомеханізмів..... | 55 |
| Список використаних джерел | 60 |

Розділ 1. Введення в дисципліну

Тема 1.1. Принцип побудови систем автоматизованого електропривода

§1 Загальна функціональна схема автоматизованого електропривода

На сьогодні всі системи автоматизованого електропривода можна представити однією загальною блок-схемою, котра має вигляд, представлений на рис. 1.

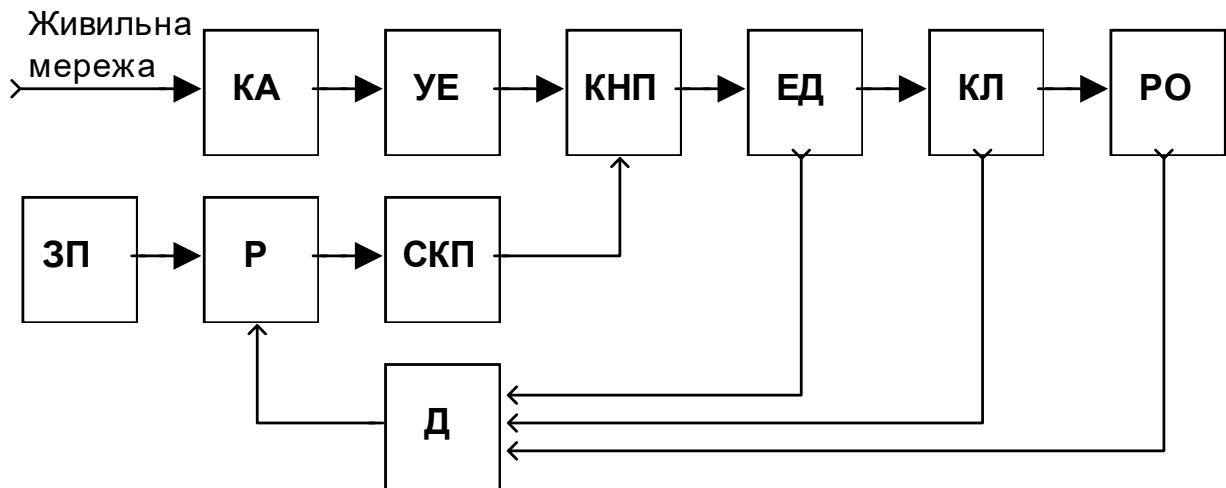


Рисунок 1 – Загальний вигляд системи автоматизованого електропривода

Позначення на схемі відповідно до двох основних каналів.

Силовий канал електроприводу:

КА – комутуюча апаратура (вимикачі, роз'єднувачі, рубильники, пускачі й т.п.);

УЕ – узгоджувальні елементи (трансформатори, реактори);

КНП – керовані напівпровідникові перетворювачі (тиристорні перетворювачі та збудники, тиристорні регулятори напруги, автономні інвертори напруги та струму, перетворювачі частоти різної структури);

ЕД – електричні двигуни (постійного та змінного струму різних типів);

КЛ – кінематична ланка (редуктори, муфти, гальма та ін.);

РО – робочий орган машини (підйомний посуд, конвеєрна стрічка, колесо турбомеханізму, ковш екскаватора, буровий інструмент і т.п.).

Керуючий канал електроприводу:

СКП – система керування силовим перетворювачем (імпульсно-фазова, комутуюча, з широтно-імпульсною модуляцією);

Р – регулятори (пропорційні, пропорційно-інтегруючі, пропорційно-диференціюючі, пропорційно-інтегруючо-диференціюючі, фазі та нейро контролери);

ЗП – задаючі пристрої (командоапарати, мікропроцесорні системи, задатчики інтенсивності різних порядків);

Д – датчики контрольованих координат (напруги, струму, швидкості, тиску, продуктивності та ін.).

Тема 1.2. Структура систем керування електроприводом

В цілому на практиці фактично мають місце три структури систем управління електроприводом любого типу.

§1 Система управління з загальним підсумовуючим підсилювачем

Один з варіантів такої структури має вигляд, представлений на рис. 2.

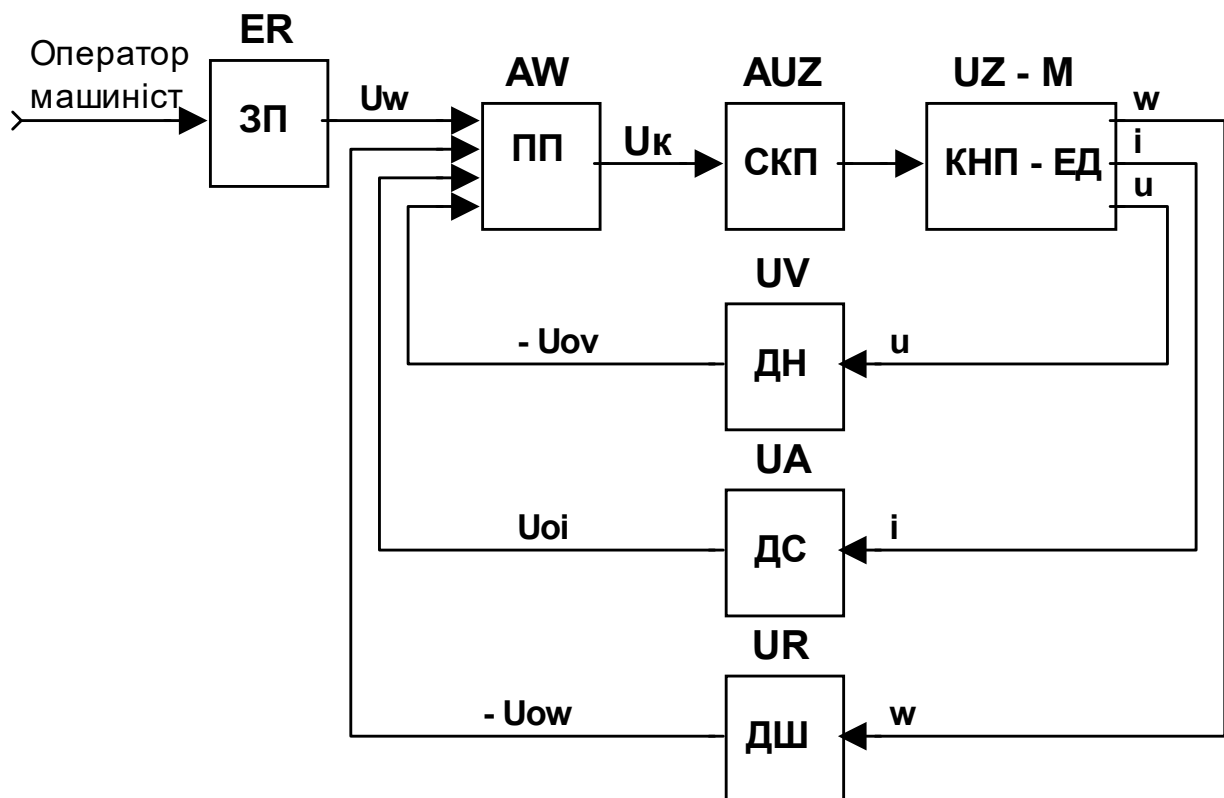


Рисунок 2 – Система управління з загальним підсумовуючим підсилювачем

Основним елементом є один підсумовуючий підсилювач ПП й всі сигнали в системі подаються йому на вхід, в тому числі і від датчиків напруги ДН, струму ДС та швидкості ДШ.

Переваги такої структури:

- простота технічної реалізації;
- прозорість з точки зору її налаштування;
- незначні цінові показники.

Недоліки:

- неможливість отримання високих статичних та динамічних показників, за рахунок відсутності регуляторів;
- регулюванню підлягає фактично одна з контрольованих перемінних, оскільки керувачий елемент один підсилювач.

Таким чином, структура з підсумуючим підсилювачем може застосовуватись для електроприводу машин і установок де відсутні високі вимоги до якості протікання технологічних режимів.

§2 Система управління з підлеглим регулюванням координат

Як правило, такі системи багатоконтурні. Кількість контурів відповідає кількості регульованих координат, при цьому кожен контур містить свій регулятор й від'ємний зворотний зв'язок. Кожен внутрішній контур як би підпорядкован зовнішньому.

Класична схема трьохконтурної системи з підлеглим регулюванням напруги, струму і швидкості наведена на рис. 3.

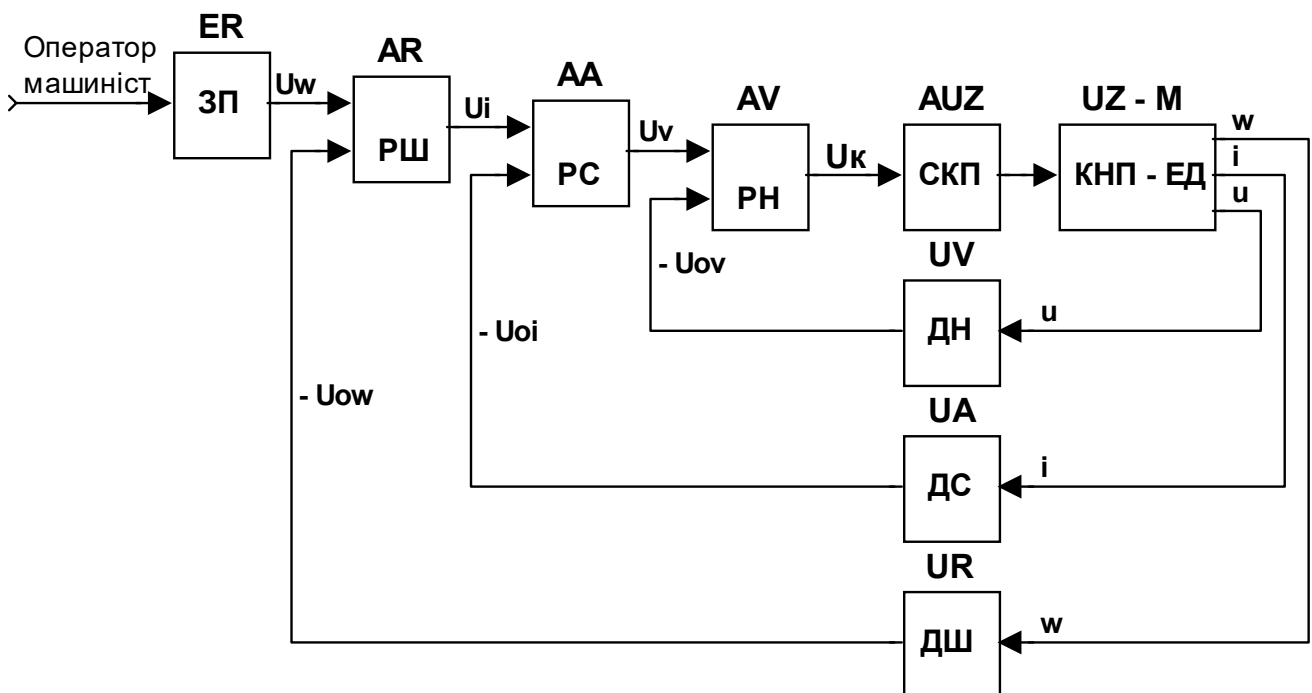


Рисунок 3 – Система управління з підлеглим регулюванням координат

Фактично, замість підсумовуючого підсилювача встановлено три регулятори: напруги РН, струму РС та швидкості РШ. Крім того, зворотні зв'язки рознесені, кожний на вхід свого регулятора.

Переваги:

- можливість отримання високих значень статичних та динамічних показників за всіма перемінними, оскільки мають місце регулятори та їх кількість відповідає кількості регулюємих координат;
- змінюючи кількість контурів, структура дозволяє реалізувати потрібні технологічні режими машин і установок любого типу й призначення.

Недоліки:

- за структурою система найбільш складна і потребує суттєвої кваліфікації обслуговуючого персоналу для коректного налаштування регуляторів;
- відносно значні цінові показники.

Недоліки:

- неможливість регулювання всіх котролюємих перемінних тому, що має місце один регулятор, але за всіма іншими координатами схема забезпечує захист всієї системи в цілому;
- деяка складність в налаштуванні, пов'язана із вибором коефіцієнтів частин ПД-регулятора: пропорційної, інтегруючої та диференційної.

Розділ 2. Типові системи автоматизованого електроприводу постійного струму

Тема 2.1. Електропривод за системою генератор-двигун Г-Д

Система Г-Д знайшла застосування в якості електроприводу головних механізмів машин і установок значної потужності, зокрема підйомних машин, екскаваторів, бурових станків та ін.

§1 Схема електроприводу за системою Г-Д з тиристорним збудженням ТЗ

Функціональна схема силового каналу автоматизованого електроприводу за системою ТЗ-Г-Д має вигляд, представлений на рис. 5.

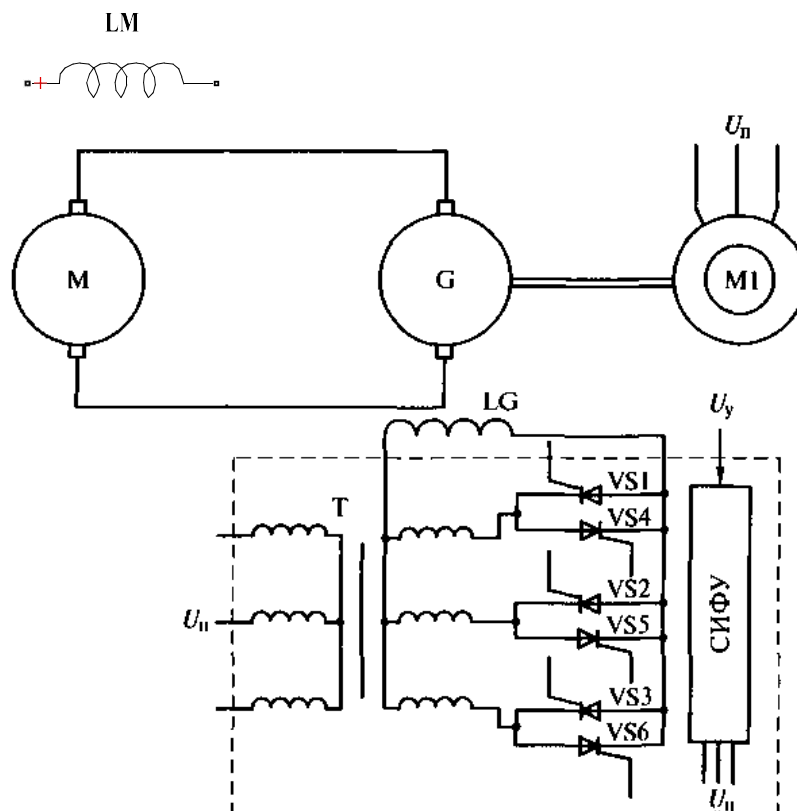


Рисунок 5 – Схема електроприводу за системою Г-Д з тиристорним збудженням ТЗ

Позначення елементів:

M – двигун постійного струму з незалежною обмоткою збудження LM ;

G – генератор постійного струму з незалежною обмоткою збудження LG ;

$M1$ – приводний двигун генератора змінного струму (асинхронний або синхронний);

$VS1-VS6$ – реверсивний тиристорний збудник за трифазною нульовою схемою;

СИФУ – система імпульсно-фазового управління кутами відкриття тиристорів;

T – узгоджуючий трансформатор з мережею живлення кола збудження.

Принцип роботи системи електроприводу за схемою Г-Д у вигляді алгоритму:

$$\omega_{M1} = \text{const} \Rightarrow \downarrow \\ \pm U_y \uparrow \downarrow \Rightarrow U_{LG} \uparrow \downarrow \Rightarrow I_{LG} \uparrow \downarrow \Rightarrow \Phi_{LG} \uparrow \downarrow \Rightarrow E_G \uparrow \downarrow \Rightarrow \pm \omega_M \uparrow \downarrow$$

Механічні характеристики системи Г-Д представлені на рис. 6.

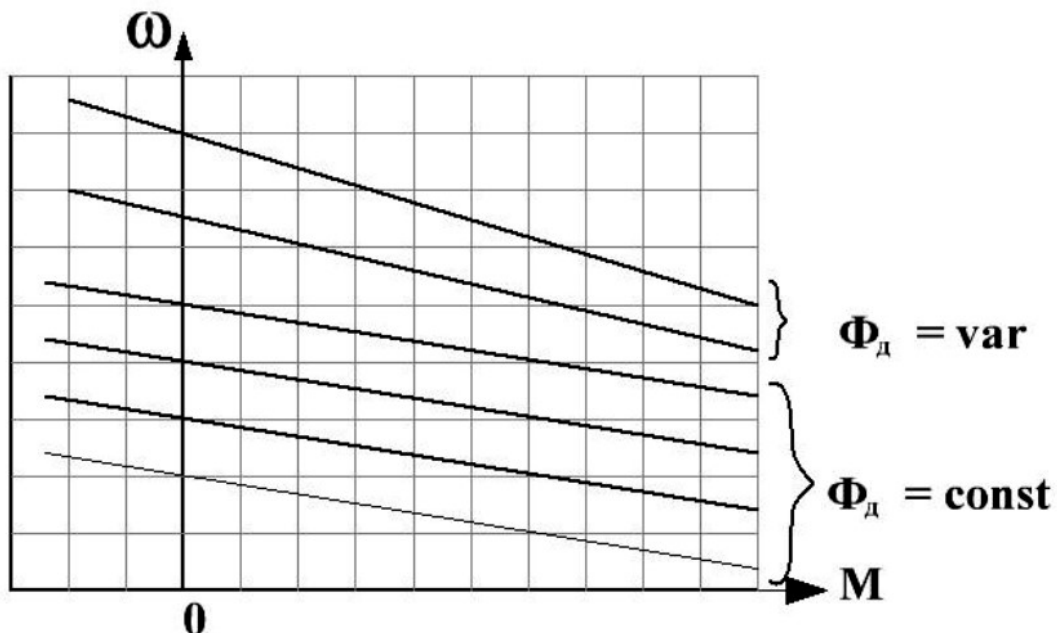


Рисунок 6 – Механічні характеристики системи Г-Д

Переваги системи Г-Д:

- можливість регулювання швидкості в досить широкому діапазоні 16:1 й більше;
- практично єдина система електроприводу, в котрій відсутнє викривлення кривої струму мережі живлення, оскільки якірні кола двигуна й генератора з'єднані тільки між собою, а комутація тиристорів відбувається не в силовому колі, а в ланці збудження, потужність якої дуже мала;
- відносно незначне споживання реактивної потужності, тобто коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ досить великий при асинхронному двигуні $M1$. Якщо в якості $M1$ застосовується синхронний двигун, можлива робота з $\cos\varphi = 1$ або з випереджаючим $\cos\varphi = 1$ для компенсації реактивної потужності, споживаної іншими установками;
- природна рекуперація енергії в мережу в генераторних режимах роботи двигуна.

Недоліки:

- головний недолік полягає в наявності двох додаткових електричних машин (генератора з приводним двигуном). З цим пов'язано: знижене значення загального ККД, значні масогабаритні та цінові показники, підвищений рівень шуму;
- значна інерційність в каналі управління за рахунок великої індуктивності обмотки збудження.

§2 Структурна схема електроприводу за системою Г-Д, розрахунок параметрів, налаштування системи

Найбільш поширеною структурою в каналі управління електроприводом за схемою Г-Д є проста система з загальним підсумовуючим підсилювачем на вході, структурна схема якої наведена на рис.7.

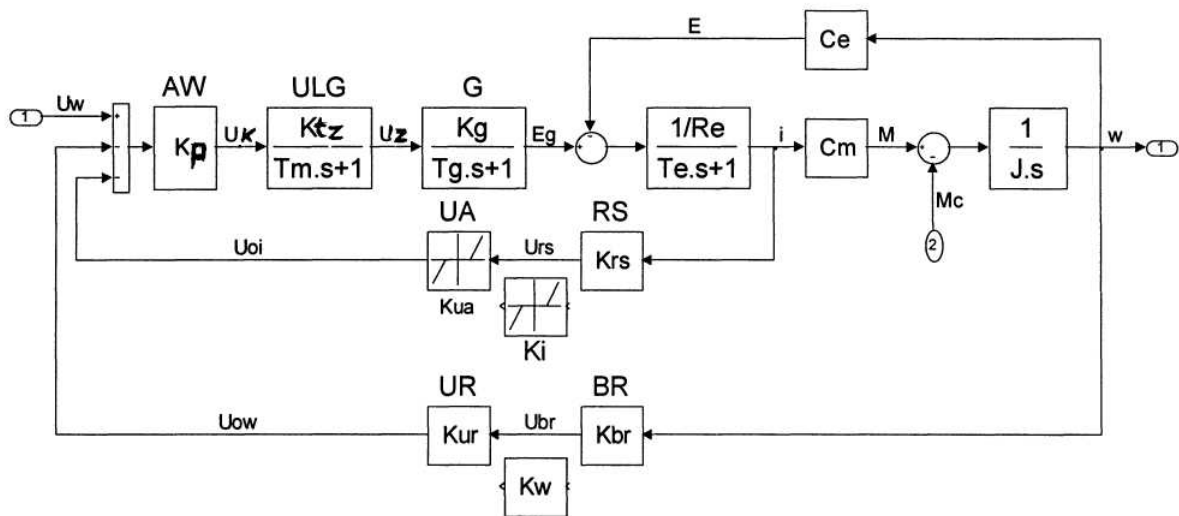


Рисунок 7 – Структурна схема електроприводу за системою Г-Д з загальним підсумовуючим підсилювачем на вході

Таблиця відповідності перемінних для системи ТЗ – Г – Д

| | | | | | | |
|----------|----------|----------|-------|-------|----------|----------|
| U_w | U_{ow} | U_{oi} | U_z | E_g | U_{rs} | U_{br} |
| $U_{зш}$ | $U_{ош}$ | $U_{ос}$ | U_z | E_g | $U_{ш}$ | $U_{тг}$ |

Таблиця відповідності параметрів для системи ТЗ – Г – Д

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|----------|-----------|----------|----------|-------|----------|----------|---------|
| C_m | C_e | K_g | T_g | K_{tz} | T_m | K_{ua} | K_{rs} | K_i | K_{ur} | K_{br} | K_w |
| C_d | C_d | K_g | T_g | $K_{тз}$ | T_{μ} | $K_{дс}$ | $K_{шн}$ | K_c | $K_{дш}$ | $K_{тг}$ | $K_{ш}$ |

Розрахунок параметрів структурної схеми системи ТЗ-Г-Д.

Повний момент інерції J системи ТЗ-Г-Д:

$$J = J_{ДВ} + J_{МЕХ.ПР}.$$

Еквівалентний активний опір R_e якірного кола:

$$R_e = R_{Я.Д} + R_{ДП.Д} + R_{КО.Д} + R_{Я.Г} + R_{ДП.Г} + R_{КО.Г} + R_{Ш}.$$

Еквівалентна індуктивність L_e якірного кола:

$$L_e = L_{Я.Д} + L_{ДП.Д} + L_{КО.Д} + L_{Я.Г} + L_{ДП.Г} + L_{КО.Г}.$$

Еквівалентна стала часу T_e якірного кола та коефіцієнт двигуна C_D :

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}; C_D = \frac{E_{НОМ.Д}}{\omega_{НОМ.Д}} = \frac{U_{НОМ.Д} - I_{НОМ.Д}(R_{Я.Д} + R_{ДП.Д} + R_{КО.Д})}{\omega_{НОМ.Д}}.$$

Стала часу генератора T_G та коефіцієнт передача генератора K_G :

$$T_G = \frac{L_e}{R_e}; K_G = \frac{E_{НОМ.Г}}{\omega_{НОМ.Г}} = \frac{U_{НОМ.Г} - I_{НОМ.Г}(R_{Я.Г} + R_{ДП.Г} + R_{КО.Г})}{\omega_{НОМ.Г}}.$$

Стала часу T_μ та коефіцієнт передачі $K_{ТЗ}$ тиристорного збудника:

$$T_\mu = 0,01 \text{ с} - \text{приймається}; K_{ТЗ} = \frac{U_{З.маx}}{U_{К.маx}} = \frac{U_{З.НОМ}}{10}.$$

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за швидкістю - загальний $K_{Ш}$, тахогенератора $K_{ТГ}$ та датчика швидкості $K_{ДШ}$:

$$K_{Ш} = \frac{U_{ОШ.маx}}{\omega_{маx}} = \frac{10}{\omega_{НОМ}}; K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ.НОМ}}{\omega_{ТГ.НОМ}}; K_{ДШ} = \frac{K_{Ш}}{K_{ТГ}}.$$

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за струмом - загальний K_C , шунта $K_{ШН}$ та датчика струму $K_{ДС}$:

$$K_C = \frac{U_{ОС.маx}}{I_{маx} - I_{ВІДС}} = \frac{10}{M_{маx} / C_D - (0,75...0,85)I_{маx}};$$

$$K_{ШН} = \frac{U_{ШН.НОМ}}{I_{ШН.НОМ}}; K_{ДС} = \frac{K_C}{K_{ШН}}.$$

Рівняння механічної характеристики системи Г-Д з загальним підсумовуючим підсилювачем на вході можливо отримати згідно структурної схеми за умови підстановки в передатні функції ланок значення $p = 0$, при цьому отримуємо наступні залежності.

Рівняння механічної характеристики системи Г-Д у випадку, коли зворотний зв'язок за струмом діє, тобто $I \geq I_{ВІДС}$

$$\omega = \frac{K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}U_{ЗШ} + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{С}I_{ВІДС}}{C_D + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{Ш}} - \frac{R_e + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{С}}{C_D + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{Ш}} \cdot \frac{M}{C_D} = \omega'_0 - \Delta\omega'$$

$$\omega'_0 = \frac{K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}U_{ЗШ} + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{С}I_{ВІДС}}{C_D + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{Ш}}, \Delta\omega' = \frac{R_e + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{С}}{C_D + K_{П}K_{ТЗ}K_{Г}K_{Ш}} \cdot \frac{M}{C_D} \quad 11$$

Рівняння механічної характеристики системи Г-Д у випадку, коли зворотний зв'язок за струмом не діє, тобто $I < I_{\text{відс}}$

$$\omega = \frac{K_{\text{П}}K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ}}}{C_{\text{Д}} + K_{\text{П}}K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ}}} - \frac{R_e}{C_{\text{Д}} + K_{\text{П}}K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ}}} \cdot \frac{M}{C_{\text{Д}}} = \omega_0 - \Delta\omega,$$

де
$$\omega_0 = \frac{K_{\text{П}}K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ}}}{C_{\text{Д}} + K_{\text{П}}K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}K_{\text{Ш}}}, \quad \Delta\omega = \frac{R_e}{C_{\text{Д}} + K_{\text{П}}K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ}}} \cdot \frac{M}{C_{\text{Д}}}$$

Таким чином за рахунок затриманого зворотного зв'язку за струмом система має два рівняння механічної характеристики. Робочій ділянці відповідає друге рівняння до точки відсічки з досить значною жорсткістю механічної характеристики, а перше рівняння формує неробочу ділянку так званої екскаваторної характеристики з малою жорсткістю характеристики на відрізку між точкою відсічки до точки стопоріння.

Настроювання системи Г-Д с загальним підсумовуючим підсилювачем на вході на потрібну швидкість $\omega_{\text{П}}$ при розрахунковому навантаженні $M_{\text{СР}}$ робиться відповідно до виразу:

$$K_{\text{П}} = \frac{C_{\text{Д}}\omega_{\text{П}} - R_e M_{\text{СР}} / C_{\text{Д}}}{K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}(U_{\text{ЗШ.П}} - K_{\text{Ш}}\omega_{\text{П}})}$$

Настроювання системи Г-Д с загальним підсумовуючим підсилювачем на вході на заданий статизм δ_3 при розрахунковому навантаженні $M_{\text{СР}}$ для нижньої границі діапазону регулювання D здійснюється за виразом:

$$K_{\text{П}} = \frac{R_e M_{\text{СР}} / C_{\text{Д}}}{\delta_3 K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ.min}}} = \frac{R_e M_{\text{СР}} D}{\delta_3 K_{\text{ТЗ}}K_{\text{Г}}U_{\text{ЗШ.max}} C_{\text{Д}}}, \text{ де } U_{\text{ЗШ.min}} = \frac{U_{\text{ЗШ.max}}}{D}$$

Тема 2.2. Електропривод за системою ТП-Д

Система ТП-Д була розроблена фактично на заміну системи Г-Д і домінувала на ринку України до появи частотно-регульованих електроприводів.

§1 Схема електроприводу за системою ТП-Д

Класична функціональна схема силового каналу автоматизованого електропривода за системою ТП-Д з реверсом в якірному колі має вигляд, представлений на рис. 8.

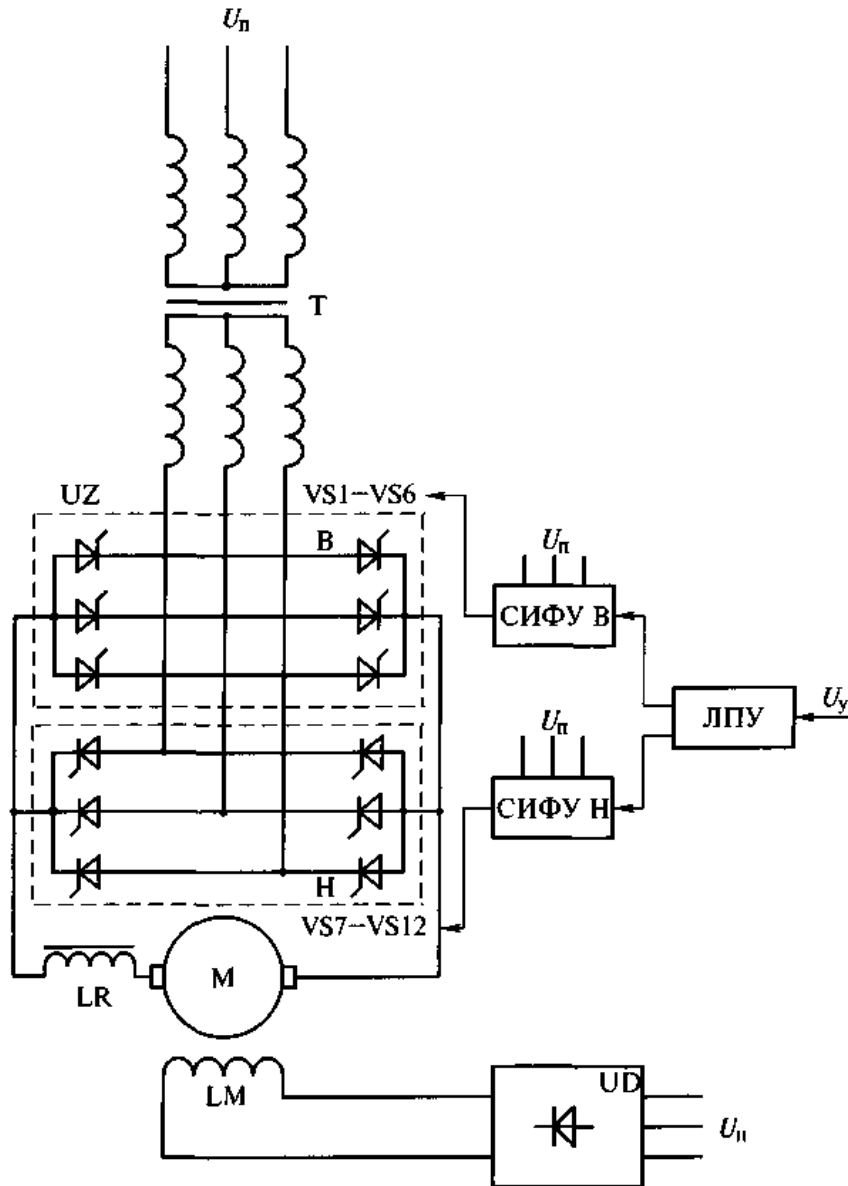


Рисунок 8 – Функціональна схема силового каналу автоматизованого електропривода за системою ТП-Д з реверсом в якірному колі

Позначення елементів:

M – двигун постійного струму з незалежною обмоткою збудження LM ;

UD – некерований випрямляч на діодах за трифазною мостовою схемою;

LR – реактор для згладжування пульсацій напруги в якірному колі;

UZ – реверсивний тиристорний перетворювач, котрий містить дві вентильні групи $VS1-VS6$ та $VS7-VS12$, з'єднані зустрічно паралельно й кожна за трифазною мостовою схемою;

T – узгоджувачий силовий трансформатор з мережею живлення;

СИФУ В, СИФУ Н – системи імпульсно-фазового управління тиристорами вентильних груп;

ЛПУ – логічний перемикаючий пристрій, щоб в роботі була тільки одна потрібна вентильна група, що виключає можливість короткого замикання в якірному колі.

Принцип роботи системи електроприводу за схемою ТП-Д у вигляді алгоритму:

$$\pm U_y \uparrow \downarrow \Rightarrow U_{UZ} \uparrow \downarrow \Rightarrow \pm \omega_M \uparrow \downarrow$$

Механічні характеристики системи ТП-Д представлені на рис. 9.

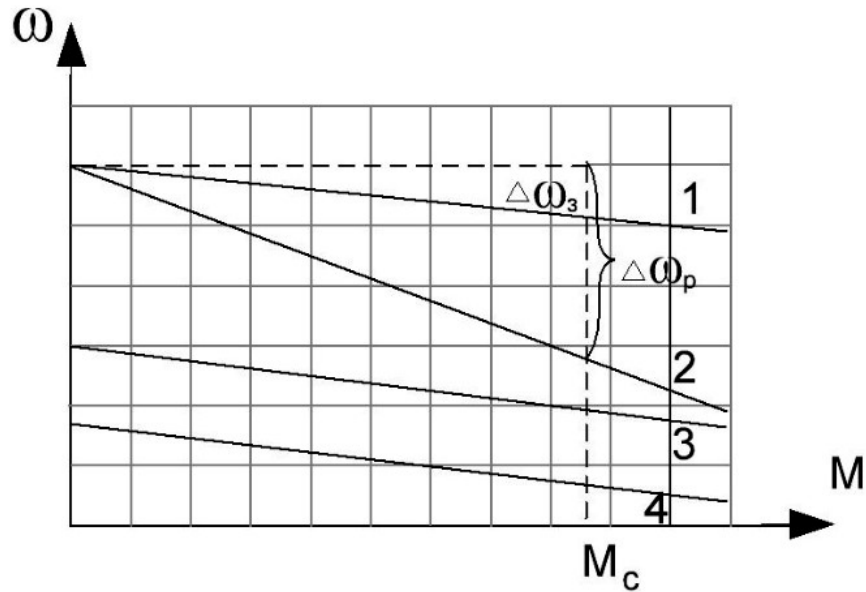


Рисунок 9 – Механічні характеристики системи ТП-Д

- 1 - в замкненій системі з нульовим кутом відкриття тиристорів;
- 2 - в розімкненій системі з малою жорсткістю характеристики;
- 3, 4 – в замкненій системі зі збільшення кута управління тиристорами.

Переваги системи ТП-Д:

- можливість регулювання швидкості в значному діапазоні;
- відсутність додаткових електричних машин, тому досить високе значення ККД, незначні масогабаритні та цінові показники, знижений рівень шуму;
- мала інерційність ТП, що дозволяє забезпечити високу швидкодію;
- висока надійність, простота обслуговування.

Недоліки:

- викривлення кривої напруги мережі живлення, оскільки комутація тиристорів відбувається в силовому колі значної потужності;
- зниження коефіцієнту потужності із збільшенням діапазону регулювання швидкості;
- для забезпечення режиму рекуперації енергії в мережу потрібно два комплекти вентилів, що підвищує складність й цінові показники.

§2 Структурні схеми електроприводу за системою ТП-Д, розрахунок параметрів, налаштування системи

Для системи електроприводу за схемою ТП-Д в основному були розроблені структури з підлеглим регулюванням координат.

Структурна схема системи ТП-Д з П-регулятором швидкості має вигляд, представлений на рис.10.

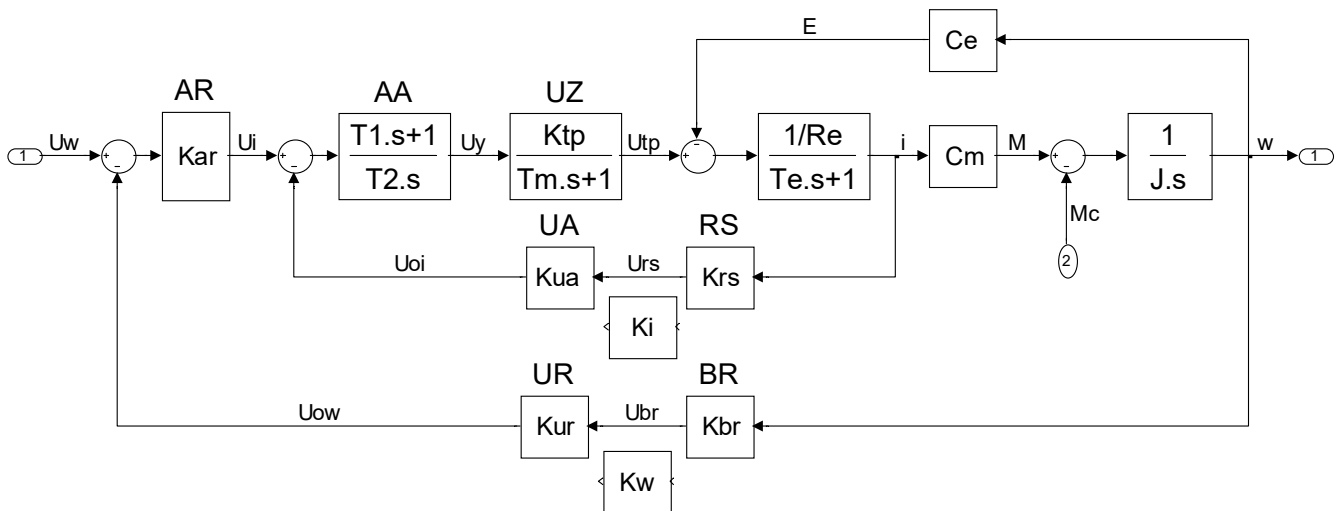


Рисунок 10 – Механічні характеристики системи ТП-Д

Таблиця відповідності перемінних для системи ТП - Д

| | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Uw | Uow | Ui | Uoi | Uy | Utp | Urs | Ubr |
| Uзш | Uош | Uзс | Uос | Uк | Uтп | Uш | Uтг |

Таблиця відповідності параметрів для системи ТП - Д

| | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| Cm | Ce | Ktp | Tm | Kua | Krs | Ki | Kur | Kbr | Kw | Kar |
| Сд | Сд | Ктп | Тμ | Кдс | Кшн | Кс | Кдш | Ктг | Кш | Крш |

Розрахунок параметрів структурної схеми системи ТП-Д.

Повний момент інерції J системи ТП-Д:

$$J = J_{ДВ} + J_{МЕХ.ПР}.$$

Еквівалентний активний опір R_e якірного кола:

$$R_e = R_{Я.Д} + R_{ДП.Д} + R_{КО.Д} + R_{Ш} + R_{ЗП} + R_{ТП},$$

$$R_{ТП} = 2R_{ТР} \text{ або } R_{ТП} = 2R_{СОР}.$$

Еквівалентна індуктивність L_e якірного кола:

$$L_e = L_{Я.Д} + L_{ДП.Д} + L_{КО.Д} + L_{ЗР} + L_{ТП},$$

$$L_{ТП} = 2L_{ТР} \text{ або } L_{ТП} = 2L_{СОР}.$$

Еквівалентна стала часу T_e якірного кола та коефіцієнт двигуна C_D :

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}; C_D = \frac{E_{НОМ.Д}}{\omega_{НОМ.Д}} = \frac{U_{НОМ.Д} - I_{НОМ.Д}(R_{Я.Д} + R_{ДП.Д} + R_{КО.Д})}{\omega_{НОМ.Д}}.$$

Стала часу T_μ та коефіцієнт передачі $K_{ТЗ}$ тиристорного перетворювача:

$$T_{\mu} = 0,01 \text{ с} - \text{приймається}; K_{ТЗ} = \frac{U_{ТП.\max}}{U_{К.\max}} = \frac{U_{ТП.\text{НОМ}}}{10}.$$

$$U_{ТП.\max} = 1,35 \cdot U_{2ТР.\text{НОМ}} \text{ або } U_{ТП.\max} = 1,35 \cdot U_{М.Ж.\text{НОМ}},$$

1,35 – коефіцієнт передачі мостової схеми ТП за напругою.

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за швидкістю – загальний $K_{Ш}$, тахогенератора $K_{ТГ}$ та датчика швидкості $K_{ДШ}$:

$$K_{Ш} = \frac{U_{ОШ.\max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{\omega_{НОМ}}; K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ.\text{НОМ}}}{\omega_{ТГ.\text{НОМ}}}; K_{ДШ} = \frac{K_{Ш}}{K_{ТГ}}.$$

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за струмом – загальний K_C , шунта $K_{ШН}$ та датчика струму $K_{ДС}$:

$$K_C = \frac{U_{ОС.\max}}{I_{\max}}; K_{ШН} = \frac{U_{ШН.\text{НОМ}}}{I_{ШН.\text{НОМ}}}; K_{ДС} = \frac{K_C}{K_{ШН}}.$$

Рівняння механічної характеристики системи ТП-Д з підлеглим регулюванням та П-регулятором швидкості можливо отримати згідно структурної схеми за умови підстановки в передатні функції ланок значення $p = 0$, при цьому отримуємо наступну залежність:

$$\omega = \frac{U_{ЗШ}}{K_{Ш}} - \frac{a_{Ш} a_C T_{\mu}}{J} M.$$

З рівняння видно, що характеристика має похил до осі моменту. Перша складова рівняння відповідає за початок характеристики в точці ідеального холостого ходу, яку задає оператор-машиніст. Друга складова формує жорсткість характеристики за рахунок вибору настроювальних параметрів регуляторів струму та швидкості.

Передатна функція регулятора струму для системи ТП-Д з підлеглим регулюванням знаходиться за класичною методикою згідно загального виразу

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{a_C T_{\mu} p W_{OK}(p)}.$$

В цьому випадку за структурою регулятор струму є пропорційно інтегруючим, тобто при стандартній настройці $a_C = 2$ маємо

$$W_{PC}(p) = \frac{T_e p + 1}{2 T_{\mu} p K_{ТП} K_C / R_e}.$$

Передатна функція регулятора швидкості для системи ТП-Д з підлеглим регулюванням при стандартній настройці на модульний оптимум знаходиться за класичною методикою згідно загального виразу

$$W_{PШ}(p) = \frac{1}{a_{Ш} a_C T_{\mu} p W_{OK}(p)}.$$

В цьому випадку за структурою регулятор швидкості є пропорційним, тобто при стандартній настройці $a_T = a_C = 2$ отримаємо

$$W_{PII}(p) = K_{PII} = \frac{K_C J}{4T_\mu C_d K_{III}}.$$

Настроювання системи ТП-Д з підлеглим регулюванням та П-регулятором швидкості на потрібну швидкість ω_{II} при розрахунковому навантаженні M_{CP} здійснюється згідно відповідного рівняння механічної характеристики системи ТП-Д, яке вирішується відносно налагоджувальних параметрів при підстановці значень потрібної швидкості та розрахункового навантаження, тобто

$$a_{III} a_C = \left(\frac{U_{3III.max}}{K_{III}} - \omega_{II} \right) \frac{J}{T_\mu M_{CP}}.$$

Настроювання системи ТП-Д з підлеглим регулюванням та П-регулятором швидкості на заданий статизм δ_3 при розрахунковому навантаженні M_{CP} для нижньої границі діапазону регулювання D здійснюється згідно відповідного рівняння механічної характеристики системи ТП-Д, яке вирішується відносно налагоджувальних параметрів при підстановці значень заданого статизму, розрахункового навантаження та діапазону регулювання, тобто

$$a_{III} a_C = \frac{\delta_3 J U_{3III.max}}{T_\mu M_{CP} K_{III} D}.$$

Структурна схема системи ТП – Д з ПІ-регулятором швидкості представлена на рис. 11.

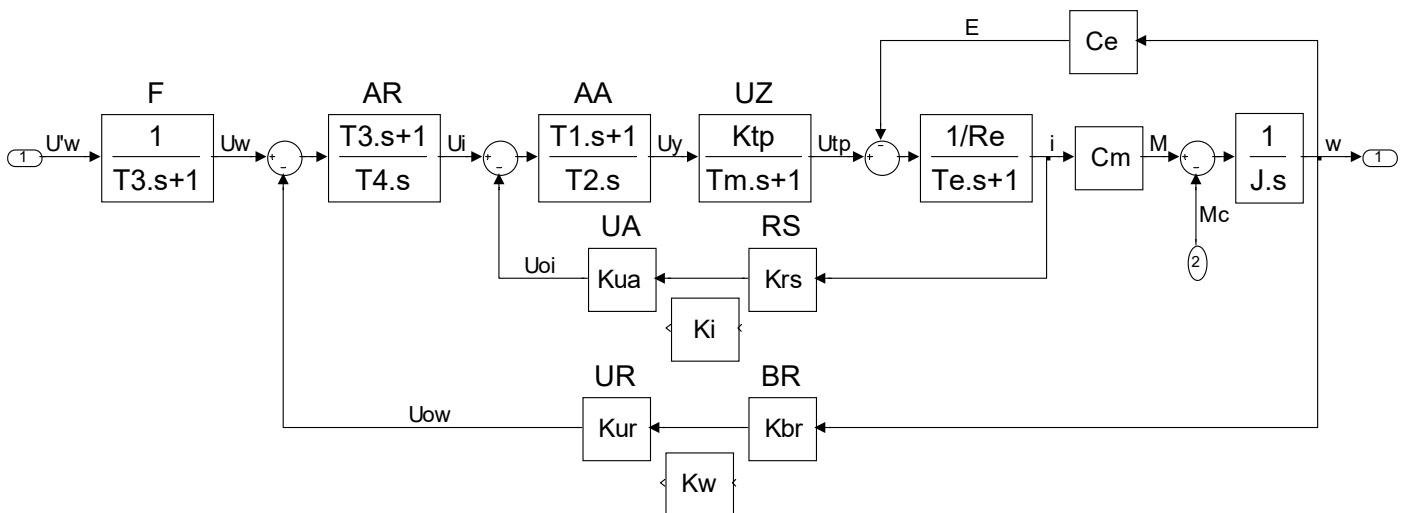


Рисунок 11 – Механічні характеристики системи ТП-Д

Рівняння механічної характеристики системи ТП-Д з підлеглим регулюванням та ПІ-регулятором швидкості можливо отримати згідно структурної схеми за умови підстановки в передатні функції ланок значення $p = 0$, при цьому отримаємо наступну залежність:

$$\omega = \frac{U_{\text{зш}}}{K_{\text{ш}}}.$$

З рівняння видно, що характеристика немає похилу до осі моменту, тобто має абсолютну жорсткість і паралельна осі моменту. Оскільки настроювальні параметри регуляторів струму та швидкості в рівняння не входять, то на статичні показники вони не впливають, а їх значення відповідають за поведінку системи в динаміці.

Передатна функція регулятора швидкості для системи ТП-Д з підлеглим регулюванням при стандартній настройці на симетричний оптимум знаходиться штучно, при цьому за структурою регулятор швидкості створюється пропорційно інтегруючим, тобто при $a_{\text{ш}} = a_{\text{с}} = b_{\text{ш}} = 2$ маємо

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{T_3 p + 1}{T_4 p}, \quad \text{де} \quad T_3 = 8T_{\mu}, \quad T_4 = T_3 / K_{\text{рш}}, \quad K_{\text{рш}} = \frac{K_{\text{с}} J}{4T_{\mu} C_{\text{д}} K_{\text{ш}}}$$

Передатна функція фільтра на вході системи ТП-Д, котрий потрібен для зменшення перерегулювання за швидкістю, при ПІ-регуляторі швидкості обирається з умови

$$W_{\phi} = \frac{1}{a_{\text{ш}} a_{\text{с}} b_{\text{ш}} T_{\mu} p + 1}.$$

Настроювання системи ТП-Д з підлеглим регулюванням та ПІ-регулятором швидкості на потрібну швидкість $\omega_{\text{п}}$ при розрахунковому навантаженні $M_{\text{ср}}$ здійснюється згідно відповідного рівняння механічної характеристики системи ТП-Д

$$K_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{зш.max}}}{\omega_{\text{п}}}.$$

Розділ 3. Типові системи автоматизованого електроприводу змінного струму

Тема 3.1. Електропривод за системою тиристорний регулятор напруги-асинхронний двигун ТРН-АД

Система ТРН-АД знайшла застосування в якості електроприводу механізмів машин і установок незначної потужності з обмеженням за часом роботи на малих швидкостях.

§1 Схема електроприводу за системою ТРН-АД

Функціональна схема нереверсивного електроприводу за системою ТРН-АД наведена на рис.1 12.

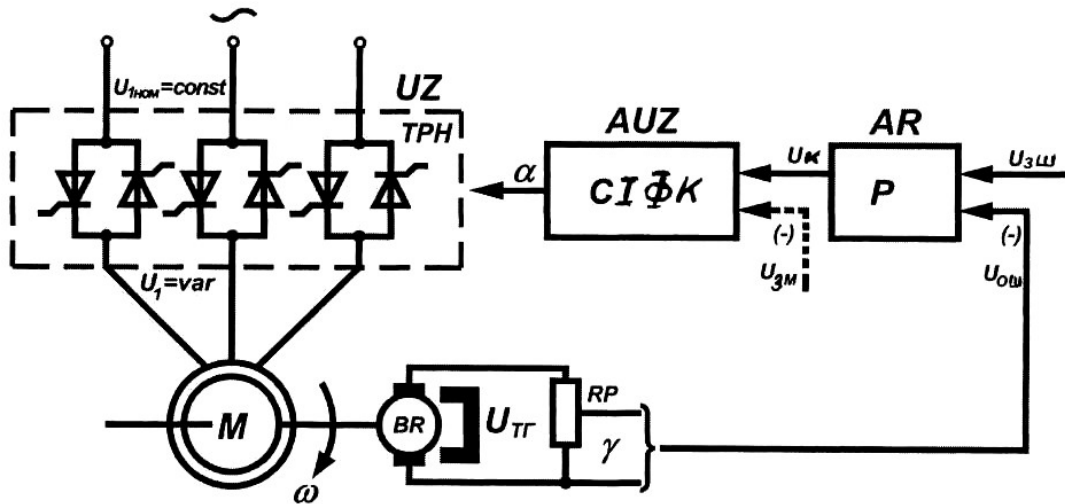


Рисунок 12 – Схема електроприводу за системою ТРН-АД

Назва та призначення основних елементів:

M – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

UZ – тиристорний регулятор напруги. Забезпечує регулювання змінної напруги, яка підводиться до статора, за величиною.

AUZ – система імпульсно-фазового керування тиристорами СИФК. Забезпечує формування кутів відкриття тиристорів.

AR – регулятор швидкості.

BR – тахогенератор. Вимірвальний елемент обертів валу двигуна.

RP – датчик швидкості для погодження напруги на виході тахогенератора з величиною сигналу на вході регулятора швидкості.

В разі необхідності реверсування електроприводу в схему додають ще дві пари тиристорів за зустрічно-паралельною схемою. Це дозволяє змінювати порядок чергування фаз напруги на обмотці статора й відповідно напрямку обертання валу двигуна.

Принцип роботи системи ТРН-АД у вигляді алгоритму:

$$U_{зм} \uparrow \downarrow \Rightarrow U_k \uparrow \downarrow \Rightarrow U_1 \uparrow \downarrow \Rightarrow \omega \uparrow \downarrow.$$

Граничне значення кута керування тиристорами α_{\min} для системи ТРН-АД не може бути меншим кута φ відставання струму статора від вхідної напруги, тому, що інакше відповідні тиристири зостануться замкненими за рахунок протилежного напрямку струму, тобто

$$\alpha_{\min} = \varphi.$$

Граничне значення кута керування тиристорами α_{\max} для системи ТРН-АД відповідає надійній роботі системи імпульсно-фазового керування, тобто

$$\alpha_{\max} = 165 \dots 175 \text{ ел.град.}$$

В схемі на вході системи імпульсно-фазового управління має місце додатковий сигнал зміщення $U_{\text{зм}}$, котрий потрібен, щоб в системі не відбувався самозапуск практично до половинної швидкості в разі нульового сигналу керування $U_{\text{к}}$, коли в системі управління тиристорами інвертора автоматично встановлюється кут $\alpha_{\max} = 90 \text{ ел.град.}$ У випадку, коли сигнал керування нульовий $U_{\text{к}} = 0$, напруга зміщення задає кут $\alpha = \alpha_{\max}$ і самозапуск відсутній, вал двигуна нерухомий. В разі, коли $U_{\text{к}} > 0$, напруга зміщення знімається.

Механічні характеристики системи ТРН-АД представлено на рис. 13 (сплошні лінії для розімкненої системи, пунктирні – для замкненої за швидкістю):

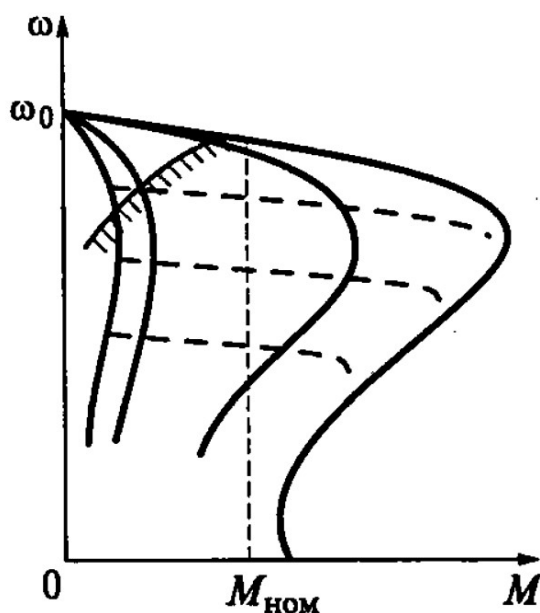


Рисунок 13 – Механічні характеристики системи ТРН-АД

Переваги:

- діапазон регулювання швидкості при використанні зворотного зв'язку за швидкістю може досягати 10 : 1 і, в такому випадку, жорсткість характеристик значна;
- простота технічної реалізації, надійність;
- низькі цінові та масогабаритні показники.

Недоліки:

- значні втрати в обмотці ротора при роботі на низьких швидкостях, що призводить до нагріву двигуна й зменшує ККД електроприводу;
- викривлення кривої напруги мережі живлення, оскільки комутація тиристорів відбувається в силовому колі.

§2 Структурні схеми електроприводу за системою ТРН-АД, розрахунок параметрів, налаштування системи

Структурна схема системи ТРН – АД з П-регулятором швидкості представлена на рис. 14.

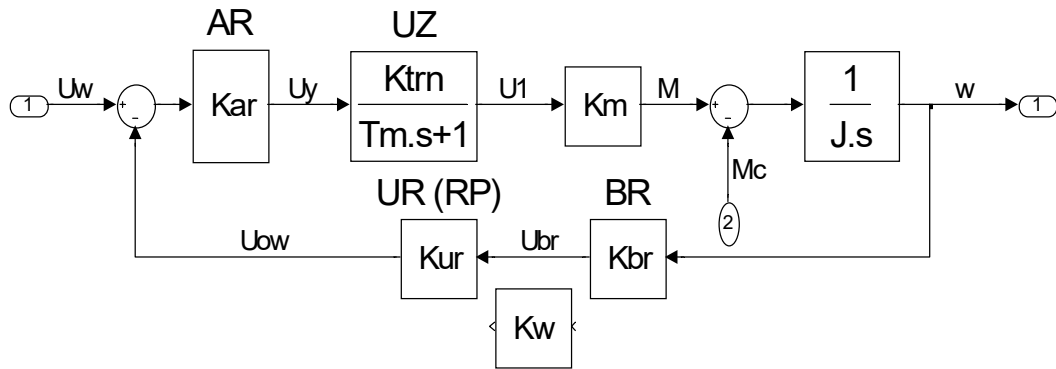


Рисунок 14 – Структурна схема системи ТРН – АД з П-регулятором швидкості

Таблиця відповідності перемінних для системи ТРН-АД

| | | | |
|------------|------------|-----------|------------|
| Uw | Uow | Uy | Ubr |
| Uзш | Uош | Uк | Uтг |

Таблиця відповідності параметрів для системи ТРН-АД

| | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| Ky | Km | Ktrn | Tm | Kur | Kbr | Kw | KAr |
| Kп | Kм | Kтрн | Tμ | Kдш | Kтг | Kш | Kрш |

Розрахунок параметрів структурної схеми:

Повний момент інерції J системи ТРН-АД:

$$J = J_{ДВ} + J_{МЕХ.ПР}.$$

Коефіцієнт передачі за моментом K_M :

$$K_M = \frac{M_{\max}}{1,1U_{1НОМ}}, \text{ де } 1,1 - \text{ коефіцієнт можливого перевищення на } 10\% \text{ но-}$$

мінального значення вхідної напруги.

Стала часу T_μ та коефіцієнт передачі $K_{ТРН}$ тиристорного регулятора на-
пруги:

$$T_\mu = 0,01 \text{ с} - \text{ приймається}; K_{ТРН} = \frac{U_{ТРН.\max}}{U_{К.\max}} = \frac{1,1U_{1НОМ}}{10}.$$

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за швидкістю – загальний $K_{Ш}$,
тахогенератора $K_{ТГ}$ та датчика швидкості $K_{ДШ}$:

$$K_{Ш} = \frac{U_{ОШ.\max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{\omega_{НОМ}}; K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ.НОМ}}{\omega_{ТГ.НОМ}}; K_{ДШ} = \frac{K_{Ш}}{K_{ТГ}}.$$

Параметри П-регулятора швидкості $K_{PШ}$ системи ТРН-АД:

$$K_{PШ} = \frac{J}{a_{Ш}T_{\mu}K_{ТРН}K_{М}K_{Ш}}.$$

Рівняння механічної характеристики лінеаризованої одноконтурної системи ТРН-АД з П-регулятором швидкості можливо отримати згідно структурної схеми за умови підстановки в передатні функції ланок значення $p = 0$, при цьому отримаємо наступну залежність:

$$\omega = \frac{U_{зШ}}{K_{Ш}} - \frac{a_{Ш}T_{\mu}}{J} M.$$

З рівняння видно, що характеристика має похил до осі моменту. Перша складова рівняння відповідає за початок характеристики в точці ідеального холостого ходу, яку задає оператор-машиніст. Друга складова формує жорсткість характеристики за рахунок вибору настроювального параметру регулятора швидкості.

Передатна функція П-регулятора швидкості для системи ТРН-АД, як одноконтурної з підлеглим регулюванням знаходиться за класичною методикою згідно загального виразу

$$W_{PШ}(p) = \frac{1}{a_{Ш}T_{\mu}pW_{OK}(p)}.$$

В цьому випадку за структурою регулятор швидкості є пропорційним, тобто при настройці на модульний оптимум $a_{Ш} = 2$ і отримаємо

$$W_{PШ}(p) = K_{PШ} = \frac{J}{a_{Ш}T_{\mu}K_{ТРН}K_{М}K_{Ш}}.$$

Настроювання одноконтурної системи ТРН-АД з П-регулятором швидкості на потрібну швидкість $\omega_{П}$ при розрахунковому навантаженні M_{CP} здійснюється згідно відповідного рівняння механічної характеристики системи ТРН-АД, яке вирішується відносно налагоджувального параметру при підстановці значень потрібної швидкості та розрахункового навантаження, тобто

$$a_{Ш} = \left(\frac{U_{зШ,max}}{K_{Ш}} - \omega_{П} \right) \frac{J}{T_{\mu}M_{CP}}.$$

Настроювання одноконтурної системи ТРН-АД з П-регулятором швидкості на заданий статизм δ_3 при розрахунковому навантаженні M_{CP} для нижньої грани-

ці діапазону регулювання D здійснюється згідно відповідного рівняння механічної характеристики системи ТРН-АД, яке вирішується відносно налагоджувального параметру при підстановці значень заданого статизму, розрахункового навантаження та діапазону регулювання, тобто

$$a_{III} = \frac{\delta_3 J U_{3III.max}}{T_\mu M_{CP} K_{III} D}.$$

Структурна схема системи ТРН – АД з ПІ-регулятором швидкості представлена на рис. 15.

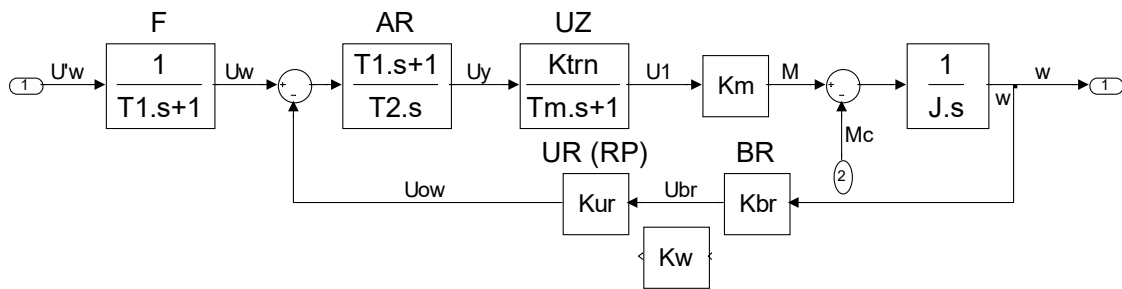


Рисунок 15 - Структурна схема системи ТРН – АД з ПІ-регулятором швидкості

Рівняння механічної характеристики лінеаризованої одноконтурної системи ТРН-АД з ПІ-регулятором швидкості можливо отримати згідно структурної схеми за умови підстановки в передатні функції ланок значення $p = 0$, при цьому отримуємо наступну залежність:

$$\omega = \frac{U_{3III}}{K_{III}}.$$

З рівняння видно, що характеристика немає похилу до осі моменту, тобто має абсолютну жорсткість і паралельна осі моменту. Оскільки настроювальний параметр регулятора швидкості в рівняння не входить, то на статичні показники він не впливає, а його значення відповідає за поведінку системи в динаміці.

Передатна функція ПІ-регулятора швидкості для системи ТРН-АД, як одноконтурної з підлеглим регулюванням знаходиться штучно, при цьому за структурою регулятор швидкості створюється пропорційно інтегруючим, тобто при стандартній настройці $a_{III} = b_{III} = 2$ отримуємо

$$W_{PIII}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p}, \text{ де } T_1 = 4T_\mu, T_2 = T_1 / K_{PIII}, K_{PIII} = \frac{J}{2T_\mu K_{TRN} K_M K_{III}}.$$

Передатна функція фільтра на вході системи ТРН-АД, котрий потрібен для зменшення перерегулювання за швидкістю, при ПІ-регуляторі швидкості обирається з умови

$$W_\Phi = \frac{1}{a_{III} b_{III} T_\mu p + 1}.$$

Налаштування одноконтурної системи ТРН-АД з ПІ-регулятором швидкості на потрібну швидкість ω_{Π} при розрахунковому навантаженні $M_{\text{ср}}$ здійснюється згідно відповідного рівняння механічної характеристики системи ТРН-АД, тобто

$$K_{\text{ПІ}} = \frac{U_{\text{ЗШ.max}}}{\omega_{\Pi}}$$

Тема 3.2. Електропривод за системою асинхронно - вентильний каскад АВК

Система АВК знайшла застосування в якості електроприводу механізмів машин і установок великої потужності із забезпеченням можливості повернення втрат ковзання асинхронної машини в мережу (підйомні машини, магістральні стрічкові конвеєри, насоси, вентилятори та ін.).

§1 Схема електроприводу за системою АВК

Функціональна схема в повному варіанті нереверсивного електроприводу за системою АВК з підлеглим регулюванням швидкості та струму представлеена на рис. 16.

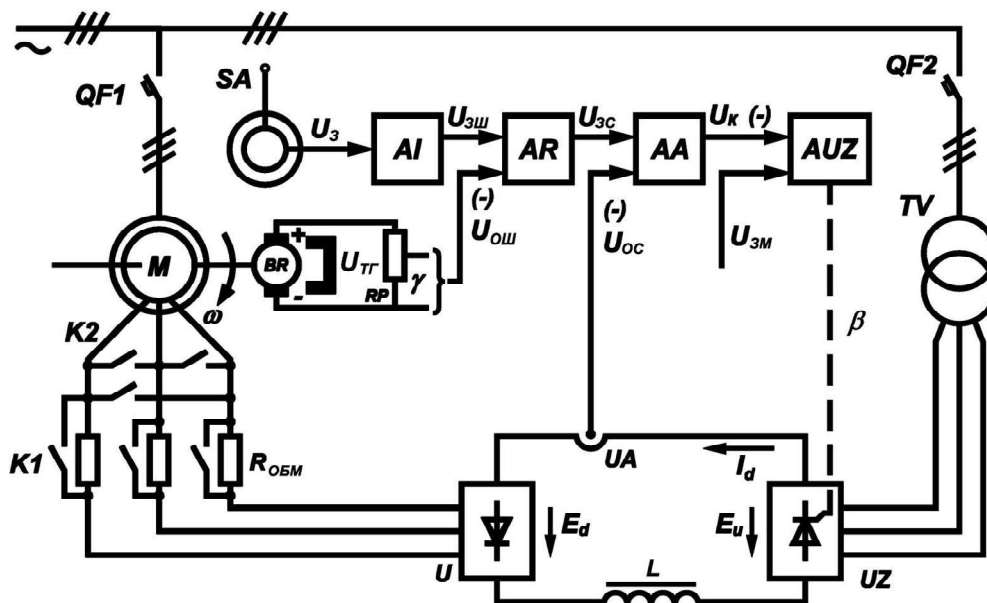


Рисунок 16 - Функціональна схема нереверсивного електроприводу за системою АВК з підлеглим регулюванням швидкості та струму

Назва та призначення основних елементів:

M – асинхронний двигун з фазним ротором.

U – некерований випрямляч на діодах за трифазною мостовою схемою. Створює ланку постійного струму в роторному колі.

UZ – керований інвертор на тиристорах за трифазною мостовою схемою. На виході формує сигнал проти-ЕРС та забезпечує передачу енергії ковзання в мережу живлення.

AUZ – система імпульсно-фазового керування тиристорами. Забезпечує формування кутів відкриття тиристорів інвертора.

L – реактор для згладжування пульсацій в ланці постійного струму.

TV – узгоджувальний трансформатор з мережею живлення.

AA – регулятор струму.

UA – датчик струму на виході випрямляча.

AR – регулятор швидкості.

BR – тахогенератор. Вимірjувальний елемент обертів валу двигуна.

RP – датчик швидкості для погодження напруги на виході тахогенератора з величиною сигналу на вході регулятора швидкості.

AI – задатчик інтенсивності першого (обмежує прискорення) або другого (обмежує прискорення та ривок) порядків.

SA – пристрій завдання швидкості на основі сельсинного командоапарату.

$R_{обм}$ – активний опір в колі ротора двигуна для обмеження пускових струмів в системі в разі значної потужності електроприводу.

$K1$ – контакти замикаються наприкінці процесу пуску й закорочують обмежувач опір, що дозволяє отримати необхідні робочі швидкості.

$K2$ – трифазний короткозамикач. Забезпечує вихід системи на природну характеристику, що дозволяє реалізувати максимальну швидкість АВК.

Енергетичний канал каскаду:

Втрати ковзання \Rightarrow Ротор М \Rightarrow U \Rightarrow UZ \Rightarrow TV \Rightarrow Мережа живлення.

Принцип роботи системи АВК у вигляді алгоритму:

$$\begin{aligned} + U_{зм} = \text{const} &\Rightarrow \\ &\Downarrow \\ U_з \uparrow\downarrow &\Rightarrow U_{зш} \uparrow\downarrow \Rightarrow U_{зс} \uparrow\downarrow \Rightarrow - U_к \uparrow\downarrow \Rightarrow E_и \downarrow\uparrow \Rightarrow \omega \uparrow\downarrow. \end{aligned}$$

Таким чином на величину швидкості ω безпосередньо впливає значення проти-ЕРС $E_и$. Чим вона більше, тим швидкість менше і навпаки.

Механічні характеристики системи АВК представлено на рис. 17.

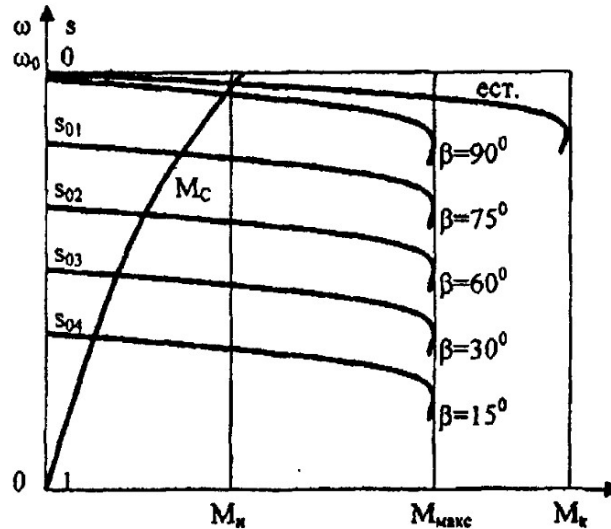


Рисунок 17 - Механічні характеристики системи АВК

Граничне значення кута керування тиристорами β_{\max} для системи АВК відповідає максимальній швидкості в системі, при цьому, значення ЕРС на виході інвертора дорівнює нулю.

$$\beta_{\max} = 90 \text{ ел.град.}$$

Граничне значення кута керування тиристорами β_{\min} для системи АВК не дозволяє виникненню режиму опрокидання інвертора, коли інвертор переходить в режим випрямляча. В цьому випадку ЕРС інвертора змінює напрямок й шумується з ЕРС некерованого випрямляча, в роторному колі виникає багатократний струм відносно розрахункового, що може призвести до серйозних аварійних ситуацій.

$$\beta_{\min} = 15 \text{ ел.град.}$$

В схемі на вході системи імпульсно-фазового управління має місце додатковий сигнал зміщення $U_{\text{зм}}$, котрий потрібен, щоб в системі не відбувався самозапуск практично до максимальної швидкості в разі нульового сигналу керування $U_{\text{к}}$, коли в системі управління тиристорами інвертора автоматично встановлюється кут $\beta_{\max} = 90 \text{ ел.град.}$ В разі $U_{\text{к}} = 0$, напруга зміщення задає кут $\beta = \beta_{\min}$ і самозапуск відсутній, вал двигуна нерухомий. В разі, коли $U_{\text{к}} > 0$, напруга зміщення залишається.

Переваги:

- регулювання швидкості в широкому діапазоні;
- високе значення ККД за рахунок повернення втрат ковзання в мережу;
- жорсткі механічні характеристики в усьому діапазоні регулювання швидкості.

Недоліки:

- значна кількість елементів в роторному колі, що погіршує цінові та масогабаритні показники;
- складність схеми силових кіл, схеми регулювання, розрахунку й налаштування системи;

- зменшення коефіцієнту потужності зі збільшенням діапазону регулювання швидкості.

§2 Структурні схеми електроприводу за системою АВК, розрахунок параметрів, налаштування системи

Структурна схема системи АВК з П-регулятором швидкості предствлена на рис. 18.

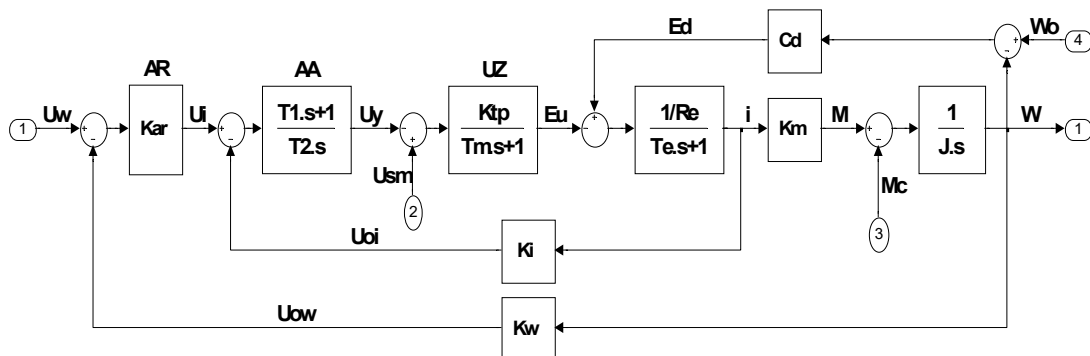


Рисунок 18 - Структурна схема системи АВК з П-регулятором швидкості

Таблиця відповідності перемінних для системи АВК

| | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| Uw | Uow | Ui | Uoi | Usm |
| Uзш | Uош | Uзс | Uос | Uзм |

Таблиця відповідності параметрів для системи АВК

| | | | | | |
|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Km | Ktp | Tm | Ki | Kw | Kar |
| Км | Ктп | Тм | Кс | Кш | Крш |

Розрахунок параметрів структурних схем:

Повний момент інерції J системи АВК:

$$J = J_{ДВ} + J_{МЕХ.ПР}$$

Еквівалентний активний опір R_e роторного кола:

$$R_e = 2R_2 + 2R_1' \cdot s + 2R_D + R_{III} + R_{ЗР} + 2R_T + 2R_{TP} + \frac{3}{2\pi} \cdot [(X_2 + X_1') \cdot s + X_{TP}]$$

Для інженерних розрахунків приймають ковзання s рівним:

$$s = s_{\max} = 1 \text{ або } s = s_{cp} = 1 - \frac{1}{D}$$

Еквівалентна індуктивність L_e якорного кола:

$$L_e = 2L_2 + 2L_1' + L_{3P} + 2L_{TP}, \text{ де}$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f_{1НОМ}}, L_1' = \frac{X_1'}{2\pi f_{1НОМ}}, L_{TP} = \frac{X_{TP}}{2\pi f_{1НОМ}}.$$

Еквівалентна стала часу T_e та коефіцієнт C_D за ЕРС та K_M за моментом:

$T_e = \frac{L_e}{R_e}$; $C_D = \frac{1,35E_{P.\max}}{\omega_0} = \frac{1,35E_{P.\max}}{0,105n_0}$, $K_M \approx C_d$ - для інженерних розрахунків.

Стала часу T_μ та коефіцієнт передачі $K_{ТП}$ інвертора:

$$T_\mu = 0,01 \text{ с} - \text{приймається}; K_{ТП} = \frac{U_{U.\max}}{U_{K.\max}} = \frac{1,35U_{2TP.НОМ}}{10},$$

де 1,35 - коефіцієнт передачі мостової схеми інвертора за напругою.

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за швидкістю – загальний $K_{Ш}$, тахогенератора $K_{ТГ}$ та датчика швидкості $K_{ДШ}$:

$$K_{Ш} = \frac{U_{ОШ.\max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{\omega_{НОМ}}; K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ.НОМ}}{\omega_{ТГ.НОМ}}; K_{ДШ} = \frac{K_{Ш}}{K_{ТГ}}.$$

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за струмом – загальний K_C , шунта $K_{ШН}$ та датчика струму $K_{ДС}$:

$$K_C = \frac{U_{ОС.\max}}{I_{\max}}; K_{ШН} = \frac{U_{ШН.НОМ}}{I_{ШН.НОМ}}; K_{ДС} = \frac{K_C}{K_{ШН}}.$$

Параметри П – регулятора струму системи АВК:

$$T_1 = T_e, T_2 = a_C T_\mu K_{ТП} K_C / R_e.$$

Параметри П-регулятора швидкості системи АВК:

$$K_{РШ} = \frac{K_C J}{a_{Ш} a_C T_\mu K_M K_{Ш}}.$$

Рівняння механічної характеристики системи АВК для П-регулятора швидкості:

$$\omega = \frac{U_{ЗШ}}{K_{Ш}} - \frac{a_{Ш} a_C T_\mu}{J} M = \omega_0 - \Delta\omega,$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{U_{ЗШ}}{K_{Ш}}, \Delta\omega = \frac{a_{Ш} a_C T_\mu}{J} M.$$

Настроювання системи АВК з П-регулятором швидкості на потрібну швидкість $\omega = \omega_{П}$ при розрахунковому навантаженні $M = M_{СР}$:

$$a_{Ш} a_C = \frac{(U_{ЗШ.П} / K_{Ш} - \omega_{П}) J}{T_\mu M_{СР}}, \text{ де } U_{ЗШ.П} = 10.$$

Настроювання системи АВК з ПІ-регулятором швидкості на заданий статизм $\delta_3 = \Delta\omega / \omega_0$ при розрахунковому навантаженні $M = M_{CP}$:

$$a_{III}a_C = \frac{\delta_3 J U_{3III.min}}{T_\mu M_{CP} K_{III}} = \frac{\delta_3 J U_{3III.max}}{T_\mu M_{CP} K_{III} D}, \text{ де } U_{3III.min} = \frac{U_{3III.max}}{D} = \frac{10}{D}.$$

Структурна схема системи АВК з ПІ-регулятором швидкості предствлена на рис. 19.

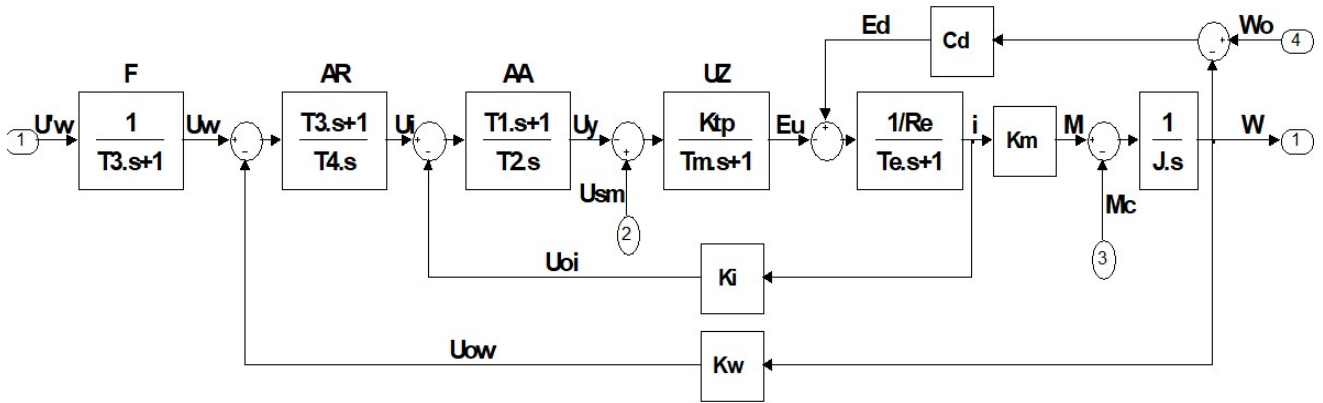


Рисунок 19 - Структурна схема системи АВК з ПІ-регулятором швидкості

Параметри ПІ-регулятора швидкості та фільтру системи АВК:

$$T_3 = a_{III}a_C b_{III} T_\mu, T_4 = T_3 / K_{PIII}, \text{ де } K_{PIII} = \frac{K_C J}{a_{III}a_C T_\mu K_M K_{III}}.$$

Рівняння механічної характеристики системи АВК для ПІ-регулятора швидкості:

$$\omega = \frac{U_{3III}}{K_{III}} = \omega_0, \text{ при цьому } \Delta\omega = 0.$$

Настроювання системи АВК с ПІ-регулятором швидкості на заданий статизм $\delta_3 = \Delta\omega / \omega_0$ сенсу не має, так як $\Delta\omega = 0, \delta = 0$.

Тема 3.3. Електропривод за системою перетворювач частоти - асинхронний двигун ПЧ-АД

Система ПЧ-АД на сьогодні знайшла застосування в якості електроприводу практично всіх механізмів машин в різних галузях промисловості України із забезпеченням високих енергетичних, статичних й динамічних показників при регулюванні швидкості.

§1 Схема електроприводу за системою ПЧ-АД

Функціональна схема найбільш поширеного варіанту системи ПЧ-АД з проміжною ланкою постійного струму представлена на рис. 20.

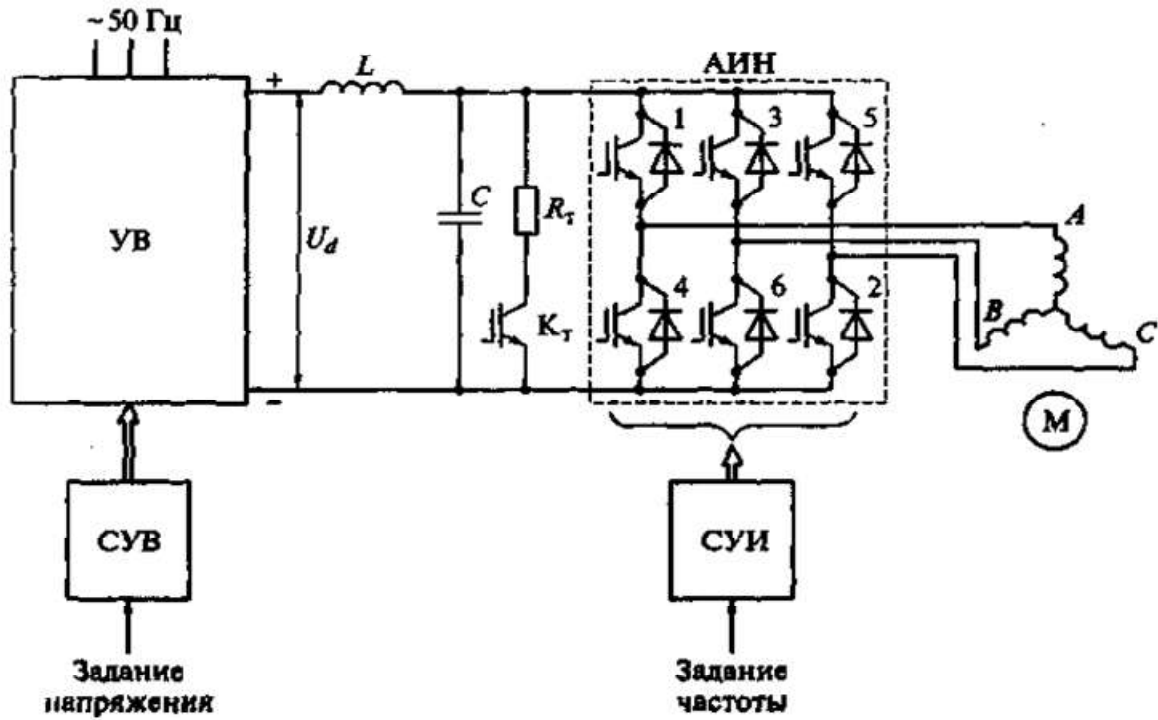


Рисунок 20 - Функціональна схема системи ПЧ-АД з проміжною ланкою постійного струму представлена

Основні елементи:

М – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

УВ – керований випрямляч на тиристорах за трифазною мостовою схемою. Створює ланку постійного струму в роторному колі, задає напругу.

СУВ – система управління випрямлячем. Звичайна СІФК, змінює кут відкриття тиристорів.

LC – реактор для згладжування пульсацій напруги та струму в ланці постійного струму.

АИН – автономний інвертор на *IGBT* транзисторних модулях. Відповідає за канал регулювання частотою напруги в обмотці статора.

СУИ – система управління автономним інвертором. Фактично задає частоту комутації транзисторів.

Випрямляч може бути некерованим на діодах. В цьому випадку *СУИ* забезпечує режим широтно-імпульсної модуляції ШІМ, коли одночасно за потрібним законом змінюється і частота і напруга на статорі.

R_т, *К_т* – комплект елементів блока гальмування електроприводу. На резисторі *R_т* гаситься енергія гальмування, а транзисторний ключ *К_т* забезпечує підключення або відключення резистора в потрібний момент.

Частотне регулювання базується на реалізації відомої залежності для машин змінного струму

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_{\Pi}}$$

Однак, властивістю цих машин є те, що при регулюванні частоти напруги змінюється не тільки швидкість поля статора, а й максимальний момент двигуна, тобто його перевантажувальна здатність. Тому, окрім зміни частоти, виникає необхідність за відповідним законом змінювати й напругу на обмотці статора, що дозволяє компенсувати зміну максимального моменту. Таким чином, система з частотним керуванням має два канали управління – частотою й напругою статора.

Принцип роботи системи ПЧ-АД у вигляді алгоритму:

$$\begin{aligned} \text{СУВ} &\Rightarrow U_D \uparrow \downarrow \Rightarrow M_{max} \\ &\quad \quad \quad \uparrow \\ \text{СУИ} &\Rightarrow f_1 \uparrow \downarrow \Rightarrow \omega_0 \uparrow \downarrow \end{aligned}$$

На сьогодні мають місце три способи керування системами ПЧ-АД, а саме:

- скалярне (управління амплітудою перемінної);
- векторне (управління проекціями вектора перемінної на дійсну та уявну осі);
- полярне (управління амплітудою перемінної та кутом вектора в просторі дійсної й уявної осей).

На практиці найбільше застосування для загальнопромислових механізмів знаходять найбільш прості закони скалярного керування, котрі й були розроблені для типових машин і установок, графічна ілюстрація наведена на рис. 21.

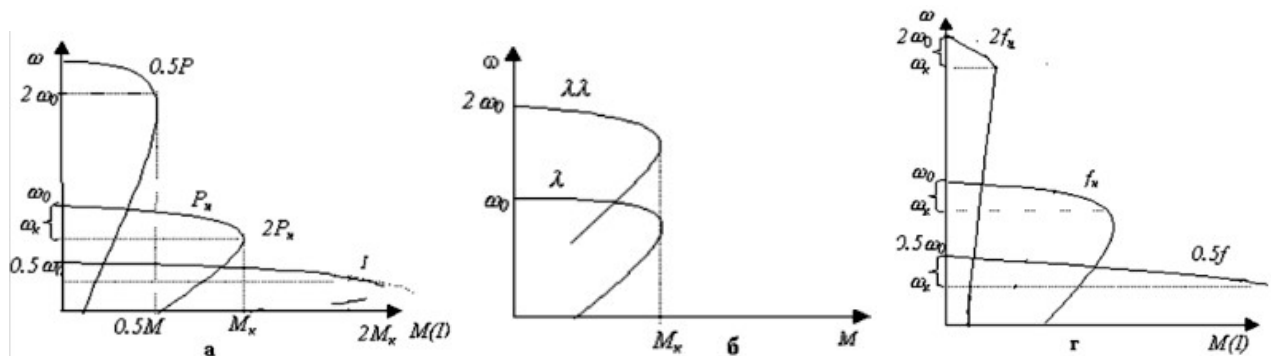


Рисунок 21 – Приклади законів скалярного керування для типових машин і установок

Найбільш поширені закони скалярного управління наступні:

а – для установок, де потрібно забезпечити сталість споживаної потужності у всіх режимах

$$\omega_0 = \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const .$$

б – для машин і механізмів з постійним статичним моментом

$$\omega_0 = \frac{U_1}{f_1} = const .$$

г – для установок з вентиляторним моментом навантаження

$$\omega_0 = \frac{U_1}{f_1^2} = const .$$

Переваги системи ПЧ-АД:

- регулювання швидкості в дуже значному діапазоні;
- сталість втрат при зміні швидкості, оскільки ковзання АД при регулюванні, незалежно від діапазону, підтримується незначним й втрати в електродвигуні невеликі;
- значна величина ККД й коефіцієнту потужності за рахунок економічного й ефективного управління;
- високі динамічні показники з потрібною мірою скорочення втрат енергії при пусках й гальмуванні;
- проста реалізація двозонного регулювання швидкості за рахунок наявності ланки постійного струму;
- суттєві аспекти ресурсозбереження механічного обладнання, так як з високою точністю відпрацювання формуються потрібні динамічні й статичні технологічні режими.

Недоліки системи:

- викривлення кривої струму мережі живлення й на обмотці статора двигуна при комутації вентилів;
- відносна складність технічної реалізації й побудови системи управління;
- необхідність високої кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- досить значні масогабаритні й цінові показники, із-за наявності додаткових елементів с колі статора;
- втрати потужності при двоступеневому перетворюванні енергії, що дещо знижує загальний ККД.

§2 Структурні схеми електроприводу за системою ПЧ-АД, розрахунок параметрів, налаштування системи

Структурна схема системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості наведена рис. 22.

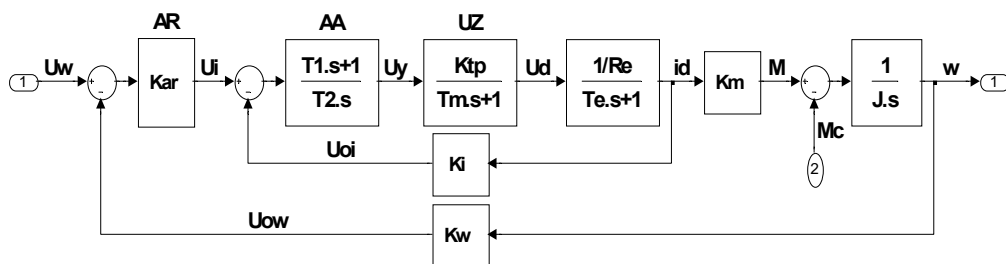


Рисунок 22 – Структурна схема системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості

Таблиця відповідності перемінних для системи ПЧ-АД

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| U_w | U_{ow} | U_i | U_{oi} |
| U_{зш} | U_{ош} | U_{зс} | U_{ос} |

Таблиця відповідності параметрів для системи ПЧ-АД

| | | | | | |
|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| K_m | K_{тп} | T_m | K_i | K_w | K_{ар} |
| K_М | K_{ТП} | T_μ | K_с | K_ш | K_{рш} |

Розрахунок параметрів структурної схеми:

Повний момент інерції J системи ПЧ-АД:

$$J = J_{ДВ} + J_{МЕХ.ПР}.$$

Еквівалентний активний опір R_e кола статора:

$$R_e = 2R_1 \cdot s + 2R_2' + 2R_{B(ТД)} + R_{Ш} + R_{ЗР} + 2R_{I(ТГР)} + 2R_{М.Ж(ТР.СОР)} + \frac{3}{2\pi} \cdot [(X_1 + X_2') \cdot s + X_{ТР}].$$

Для інженерних розрахунків приймають ковзання s рівним:

$$s = s_{\max} = 1 \text{ або } s = s_{cp} = 1 - \frac{1}{D}.$$

Еквівалентна індуктивність L_e якірного кола:

$$L_e = 2L_1 + 2L_2' + L_{ЗР} + 2L_{ТР}, \text{ де } L_2' = \frac{X_2'}{2\pi f_{1НОМ}}, L_1 = \frac{X_1}{2\pi f_{1НОМ}}, L_{ТР} = \frac{X_{ТР}}{2\pi f_{1НОМ}}.$$

Еквівалентна стала часу T_e та коефіцієнти K_M за моментом:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}; \quad K_M = \frac{M_{\max}}{I_{d \max}}.$$

Стала часу T_μ та коефіцієнт передачі $K_{ТП}$:

$$T_\mu = 0,01 \text{ с} - \text{приймається}; \quad K_{ТП} = \frac{U_{d \max}}{U_{К. \max}} = \frac{1,35U_{2ТР.НОМ}}{10},$$

де 1,35 - коефіцієнт передачі мостової схеми випрямляча за напругою.

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за швидкістю – загальний $K_{Ш}$, тахогенератора $K_{ТГ}$ та датчика швидкості $K_{ДШ}$:

$$K_{Ш} = \frac{U_{ОШ.\max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{\omega_{НОМ}}; K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ.НОМ}}{\omega_{ТГ.НОМ}}; K_{ДШ} = \frac{K_{Ш}}{K_{ТГ}}.$$

Коефіцієнти передачі зворотного зв'язку за струмом – загальний K_C , шунта $K_{ШН}$ та датчика струму $K_{ДС}$:

$$K_C = \frac{U_{ОС.\max}}{I_{d\max}} = \frac{10}{M_{\max} / K_M}; K_{ШН} = \frac{U_{ШН.НОМ}}{I_{ШН.НОМ}}; K_{ДС} = \frac{K_C}{K_{ШН}}.$$

Параметри ПІ – регулятора струму системи ПЧ-АД:

$$T_1 = T_e, T_2 = a_C T_\mu K_{ТП} K_C / R_e.$$

Параметри П-регулятора швидкості системи АВК:

$$K_{РШ} = \frac{K_C J}{a_{Ш} a_C T_\mu K_M K_{Ш}}.$$

Рівняння механічної характеристики системи ПЧ-АД для П-регулятора швидкості:

$$\omega = \frac{U_{ЗШ}}{K_{Ш}} - \frac{a_{Ш} a_C T_\mu}{J} M = \omega_0 - \Delta\omega,$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{U_{ЗШ}}{K_{Ш}}, \Delta\omega = \frac{a_{Ш} a_C T_\mu}{J} M.$$

Настроювання системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості на потрібну швидкість $\omega = \omega_{П}$ при розрахунковому навантаженні $M = M_{СР}$:

$$a_{Ш} a_C = \frac{(U_{ЗШ.П} / K_{Ш} - \omega_{П}) J}{T_\mu M_{СР}}, \text{ де } U_{ЗШ.П} = 10.$$

Настроювання системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості на заданий статизм $\delta_3 = \Delta\omega / \omega_0$ при розрахунковому навантаженні $M = M_{СР}$ для нижньої границі діапазону регулювання D :

$$a_{Ш} a_C = \frac{\delta_3 J U_{ЗШ.\min}}{T_\mu M_{СР} K_{Ш}} = \frac{\delta_3 J U_{ЗШ.\max}}{T_\mu M_{СР} K_{Ш} D}, \text{ де } U_{ЗШ.\min} = \frac{U_{ЗШ.\max}}{D} = \frac{10}{D}.$$

Структурна схема системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості наведена рис. 23.

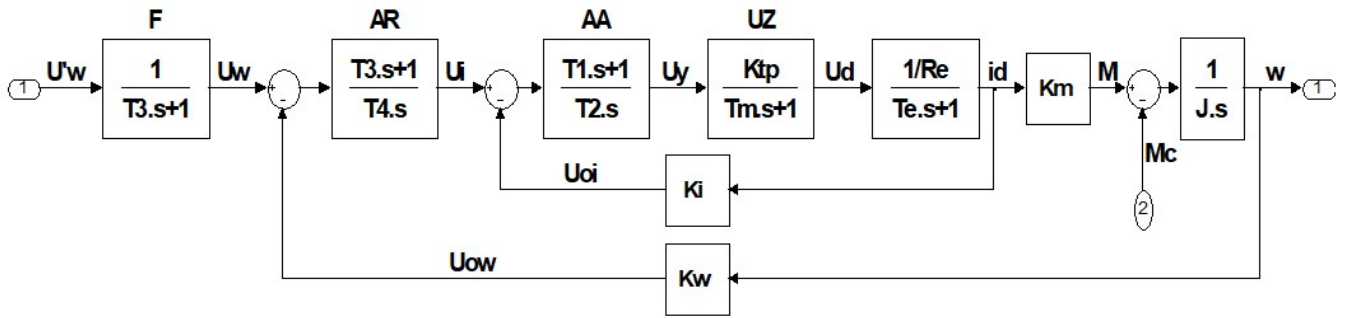


Рисунок 23 – Структурна схема системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості

Параметри ПІ-регулятора швидкості та фільтру системи ПЧ-АД:

$$T_3 = a_{III} a_{CIII} b_{III} T_{\mu}, \quad T_4 = T_3 / K_{PIII}, \quad \text{де } K_{PIII} = \frac{K_C J}{a_{III} a_{CIII} T_{\mu} K_M K_{III}}.$$

Рівняння механічної характеристики системи ПЧ-АД для ПІ-регулятора швидкості:

$$\omega = \frac{U_{3III}}{K_{III}} = \omega_0, \quad \text{при цьому } \Delta\omega = 0.$$

Настроювання системи ПЧ-АД з ПІ-регулятором швидкості на потрібну швидкість $\omega = \omega_{II}$ при розрахунковому навантаженні $M = M_{CP}$

$$K_{III} = \frac{U_{3III.P.}}{\omega_{II}}.$$

Настроювання системи ПЧ-АД з ПІ-регулятором швидкості на заданий статизм $\delta_3 = \Delta\omega / \omega_0$ сенсу не має, так як $\Delta\omega = 0, \delta = 0$.

Розділ 4. Побудова і особливості функціонування систем електропривода машин і установок

Тема 4.1. Автоматичне керування електроприводом підйомних машин

§1 Загальні положення

Підйомні установки відносяться до класу машин циклічної дії, тобто має місце поняття робочого циклу, основні складові якого наступні: розгін, усталений рух, гальмування до повної зупинки й пауза на завантаження або розвантаження матеріалу.

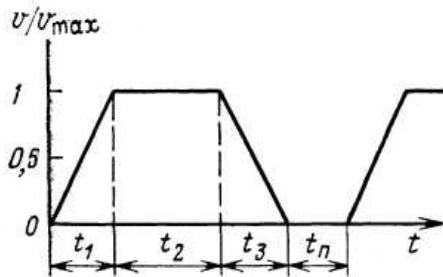
Основні вимоги до електроприводу:

- максимально точне відпрацювання швидкісних діаграм робочого циклу для забезпечення потрібної розрахункової продуктивності установки;
- реалізація великого початкового пускового моменту, забезпечення значної перевантажувальної здатності, обов'язковий режим реверсу привода за технологією роботи підйомника;
- забезпечення незалежності частоти обертання валу двигуна від зміни навантаження;
- здійснення режиму динамічного гальмування;

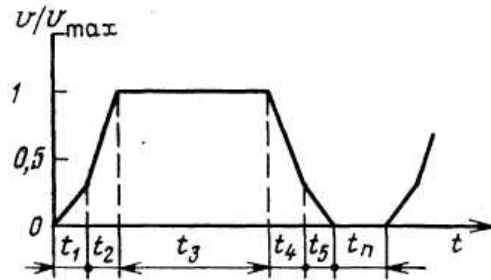
- стійка робота з максимальною й мінімальною швидкостями при зміні навантаження;
- регулювання швидкості в широкому діапазоні: від нуля до максимальної швидкості й від максимальної швидкості до нуля;
- зручність для автоматичного управління, надійність й безпека в роботі.

До останнього часу для підйомних машин застосовувались стандартні діаграми швидкості рис. 24.

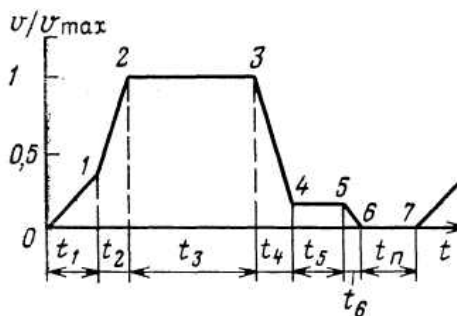
Трьохперіодна діаграма швидкості



П'ятиперіодна діаграма швидкості



Шестиперіодна діаграма швидкості



Семиперіодна діаграма швидкості

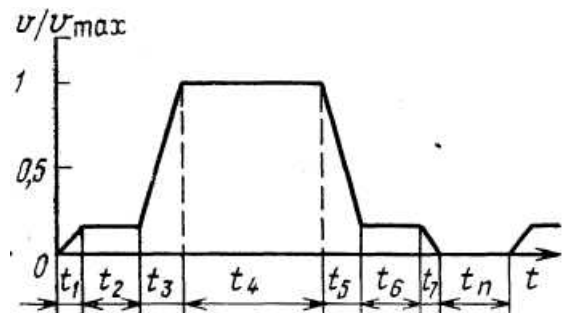


Рисунок 24 – Приклади стандартних діаграм швидкості

Перші дві діаграми використовують для людського підйому та вантажного з неопрокидними сосудами. Дві останні діаграми призначені для вантажного підйому з опрокідними сосудами. Всі чотири діаграми забезпечують лінійний закон зміни швидкості з обмеженням прискорення (моменту), котре прикладається східчасто стрибком. Для підйомних машин це означає наявність ривків в канаті й ударів в зубчастих передачах редукторів.

На сьогодні для любого типу підйомних машин можливо застосування універсальної уніфікованої швидкісної діаграми представленої на рис. 25

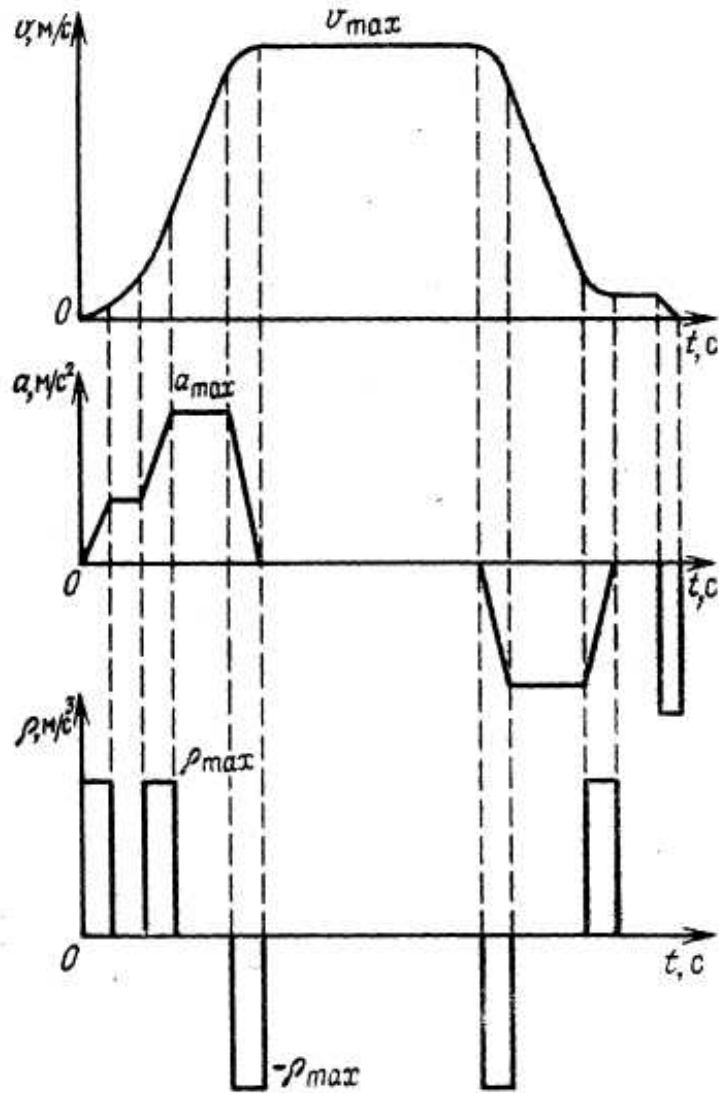


Рисунок 25 – Універсальна уніфікована швидкісна діаграма

Така діаграма обмежує ще й ривок системи, а прискорення (момент) змінюється плавно за лінійним законом. В цьому випадку ривки в підйомних канатах та удари в передачах редукторів відсутні.

Найбільш важливими для підйомних установок є режими гальмування, за допомогою яких забезпечується точна зупинка судів на прийомній площадці.

Графічна ілюстрація можливих гальмівних режимів залежності від величини й напрямку гальмівного зусилля F_1 :

Діаграма швидкості при уповільненні підйомних судів в рушійному режимі $F_1 > 0$ – механічний режим за допомогою гальмівних колодок (рис.26).

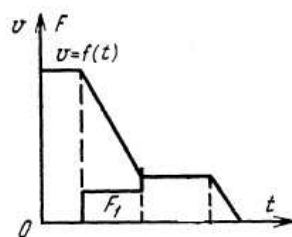


Рисунок 26 – Діаграма швидкості при уповільненні підйомних посудів в рушійному режимі $F_1 > 0$

Діаграма при уповільненні підйомних посудів з гальмівним зусиллям $F_1 < 0,3 F_{\text{ном}}$ – також механічний режим гальмування колодками (рис. 27).

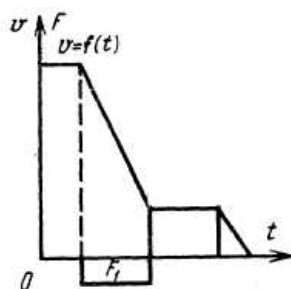


Рисунок 27 – Діаграма при уповільненні підйомних посудів з гальмівним зусиллям $F_1 < 0,3 F_{\text{ном}}$

Діаграма при уповільненні підйомних посудів з гальмівним зусиллям $F_1 \geq 0,3 F_{\text{ном}}$ – електричний режим динамічного гальмування (рис. 28).

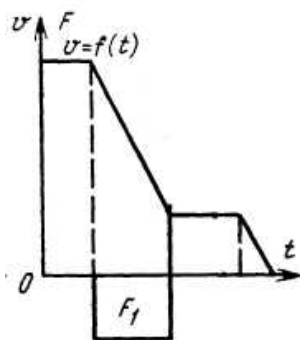


Рисунок 28 – Діаграма при уповільненні підйомних посудів з гальмівним зусиллям $F_1 \geq 0,3 F_{\text{ном}}$

Діаграма при уповільненні підйомних посудів з гальмівним зусиллям $F_1 = 0$ – режим вільного вибігу з відключенням приводного двигуна від мережі живлення (рис. 29).

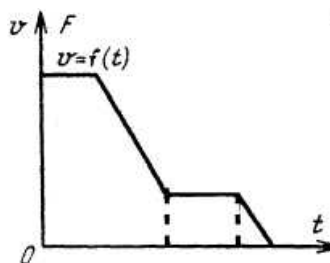


Рисунок 29 – Діаграма при уповільненні підйомних посудів з гальмівним зусиллям $F_1 = 0$

- ФП – функціональний перетворювач (формує вихідний сигнал, розтягуючи зону малих швидкостей за дугою переміщення ручки СКАР, щоб підвищити плавність і точність керування машиною);
- ЗП – задаючий пристрій (на базі задатчиків інтенсивності ЗІ-1 або ЗІ-2);
- П – підсумовуючий підсилювач;
- ВЗЗ – вузол зворотних зв'язків (за швидкістю та струмом);
- РГ1 – реле гасіння інтеграторів задатчика ЗП (щоб виключити зворотний хід судів, тримаючи деякий час нульовий сигнал на виході ЗП);

СКАР – сельсинний командоапарат (задає первинний керуючий сигнал);

СКТ – схема керування і технологічного контролю (подає команди: на початок руху, на розгальмування машини механічними гальмами через регулятор тиску РТ, на збільшення струму збудження до номінального значення);

АСЗ – апарат струмового захисту:

- ПШ – чутливий підсилювач (реагує на початкову малу напругу ТГ);
- РШ – реле швидкості (коли починається рух з малою швидкістю, спрацьовує РШ і дає команду СКТ на відключення РГ1 і обмеження в ЗП знімаються).

Для забезпечення зупинки машини СКТ подає сигнал в ВЗШ на зменшення швидкості до нуля і машина гальмується механічним гальмом.

§3 Електропривод за системою ТП-Д

Функціональна схема електропривода підйомної установки системи ТП-Д за 12-ти пульсною схемою тиристорного перетворювача в якірному колі та реверсивним тиристорним збудником представлена на рис. 31.

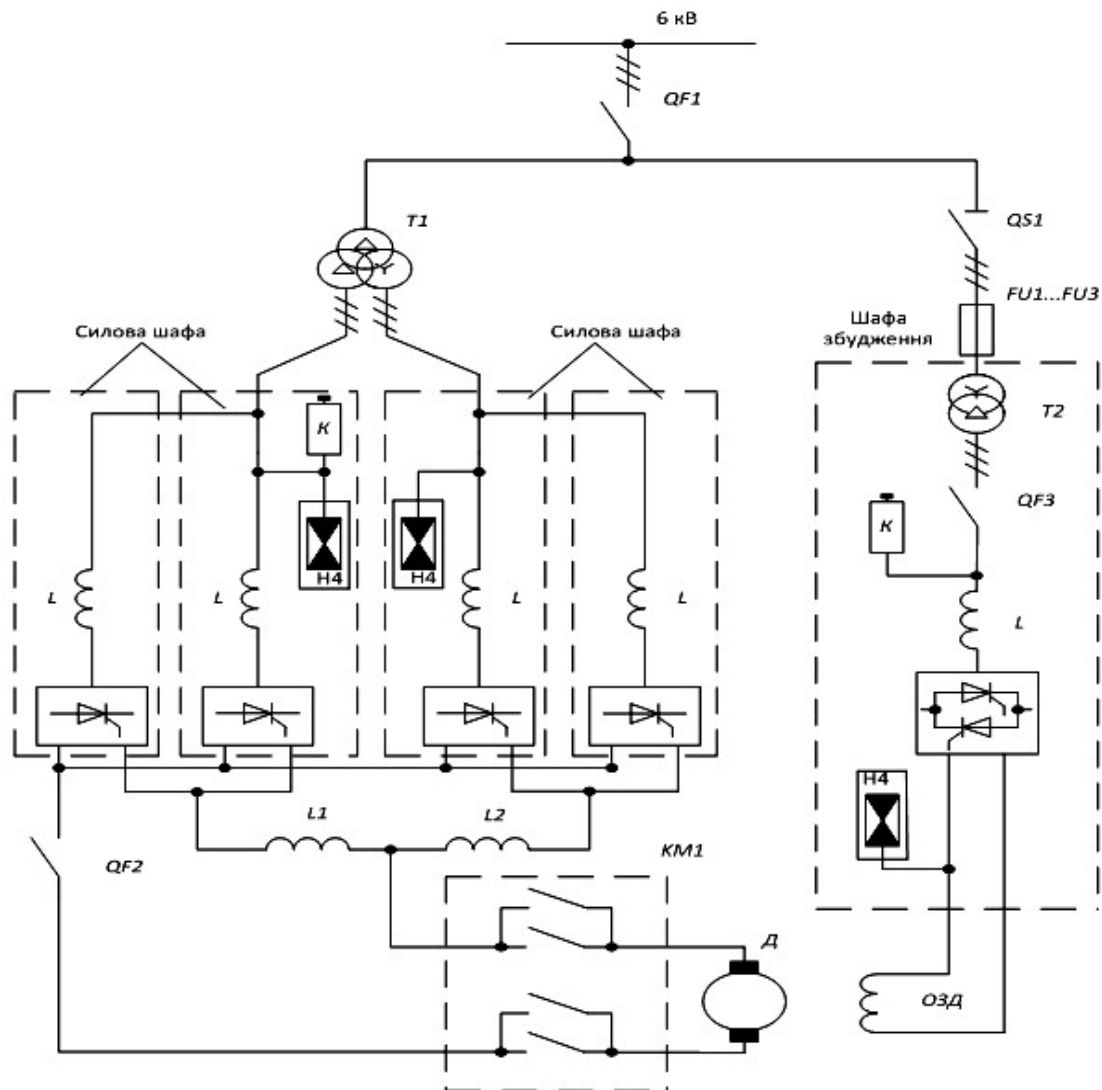


Рисунок 31 – Функціональна схема електропривода підйомної установки системи ТП-Д за 12-ти пульсною схемою тиристорного перетворювача в якірному колі та реверсивним тиристорним збудником

Позначення й функції елементів:

QF1, QF2, QF3 – автоматичні вимикачі відповідно вхідний, в колі якоря, в колі збудження

QS1 – роз'єднувач в колі збудження

FU1...FU3 – запобіжники в колі збудження

T1, T2 – відповідно силовий трансформатор з двома вторинними обмотками трикутник та зірка (забезпечує реалізацію 12-пульсної схеми ТП) та трансформатор в колі збудження (звичайний: первинна обмотка – зірка, вторинна – трикутник)

L - струмообмежувальні реактори

L1, L2 – згладжуючі дроселі

Д – двигун постійного струму з незалежною обмоткою збудження ОЗД

KM1 – магнітний пускач двигуна

H4, K – елементи захисту від перенапруг

Однолінійна схема електропривода підйомної установки системи ТП-Д з реверсивним перетворювачем в якірному колі за 12-ти пульсною схемою та неререверсивним тиристорним збудником представлена на рис. 32.

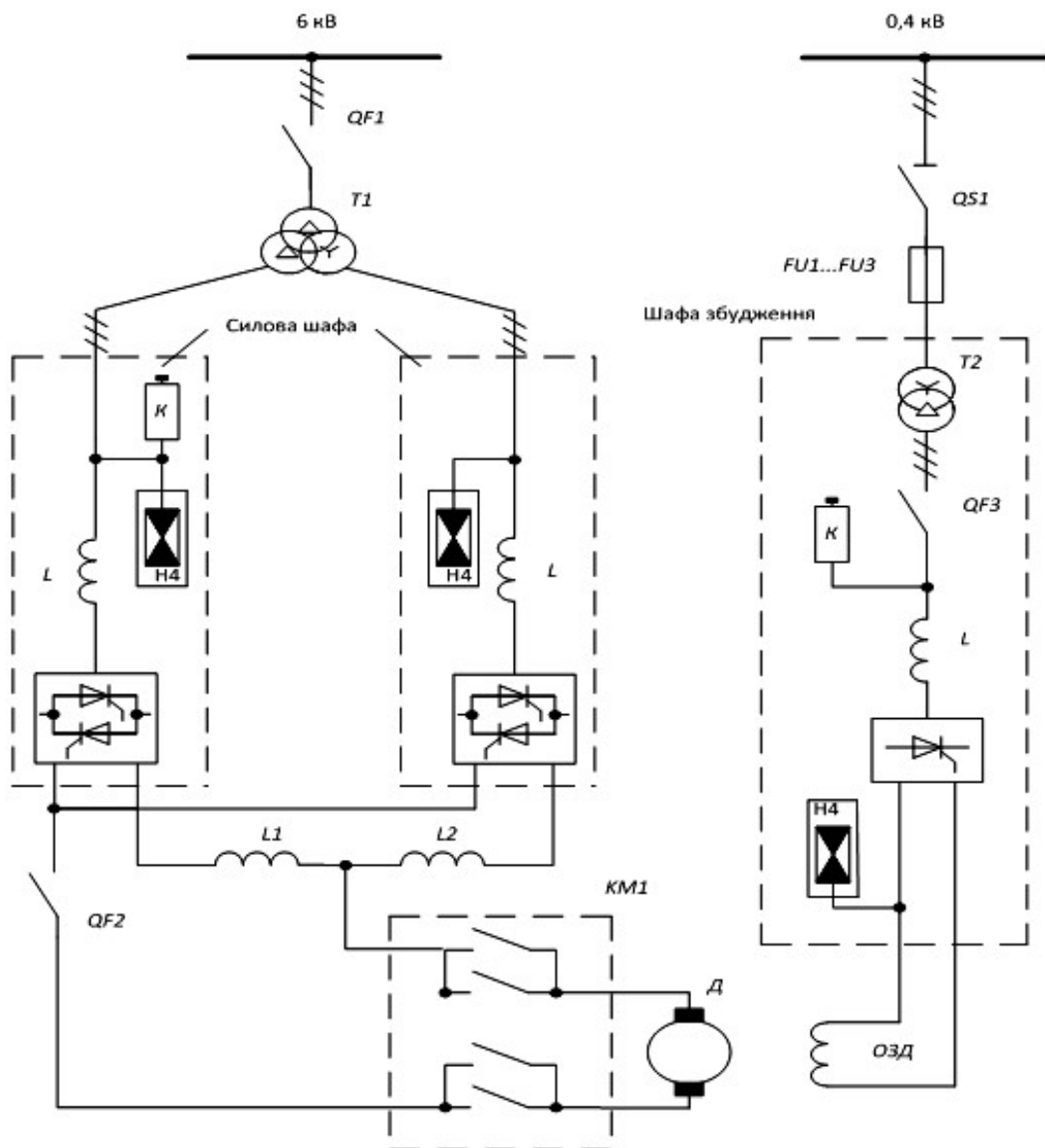


Рисунок 32 – Однолінійна схема електропривода підйомної установки системи ТП-Д з реверсивним перетворювачем в якірному колі за 12-ти пульсною схемою та неререверсивним тиристорним збудником

Позначення й функції елементів:

QF1, QF2, QF3 – автоматичні вимикачі відповідно вхідний, в колі якоря, в колі збудження;

QS1 – роз'єднувач в колі збудження; FU1...FU3 – запобіжники в колі збудження;

T1, T2 – відповідно силовий трансформатор з двома вторинними обмотками трикутник та зірка (забезпечує реалізацію 12-пульсної схеми ТП) та трансформатор в колі збудження (звичайний: первинна обмотка – зірка, вторинна – трикутник);

L - струмообмежувальні реактори;

L1, L2 – згладжуючі дроселі;

- ШКН – шафа комутаційна низьковольтна (підключає трифазний опір до ротора двигуна на час протікання перехідних процесів при спрацьовуванні реверсора);
- АТК – асинхронно-тиристорний каскад з комплектом згладжувальних реакторів:
- РКВ – роторний перетворювач;
 - МКВ – мережний перетворювач;
- TV - узгоджуючий трансформатор з мережею;
- ТГ – тахогенератор;
- МПСК – мікропроцесорна система керування:
- РШ – регулятор швидкості;
 - РС – регулятор струму;
 - СІФК – системи імпульсно-фазового керування РКВ та МКВ;
 - f – елемент вираховування знака вихідного сигналу РШ, що визначає режим роботи роторного та мережного перетворювачів (позитивний: РКВ – випрямляч, МКВ – інвертор; негативний: РКВ – інвертор, МКВ - випрямляч);
 - ПК – пульт керування.

Функціональна схема комплекту електропривода підйомної установки з одним двигуном за системою АТК представлена на рис. 34.

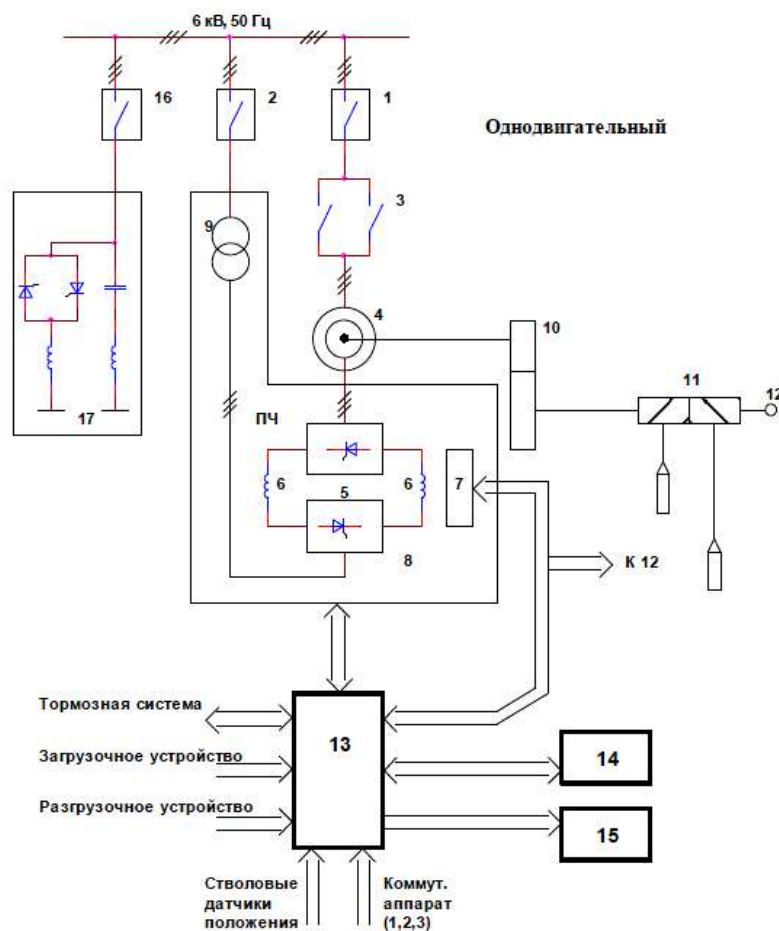


Рисунок 34 – Функціональна схема комплекту електропривода підйомної установки з одним двигуном за системою АТК

Нумерація й назва елементів:

1, 2, 16 – високовольтні вимикачі;

- 3 – реверсор;
- 4 – асинхронний двигун з фазним ротором;
- 8 – перетворювач частоти ПЧ:
 - 5 – два тиристорних моста: роторний і мережний;
 - 6 – згладжуючі дроселі;
 - 7 – мікропроцесорна система управління;
 - 9 – узгоджувачий трансформатор;
- 10 – редуктор;
- 11 – барабан підйомної машини; ;
- 12 – енкодер (імпульсний датчик обертання);
- 13 – система управління підйомною машиною на базі логічного контролера;
- 14 – диспетчерський пункт;
- 15 – система візуального відображення інформації про роботу установки;
- 17 – фільтро-компенсуючий пристрій в складі резонансного LC фільтра та тиристорного регулятора реактивної потужності.

Функціональна схема комплекту електропривода підйомної установки з двома двигунами за системою АТК представлена на рис. 35.

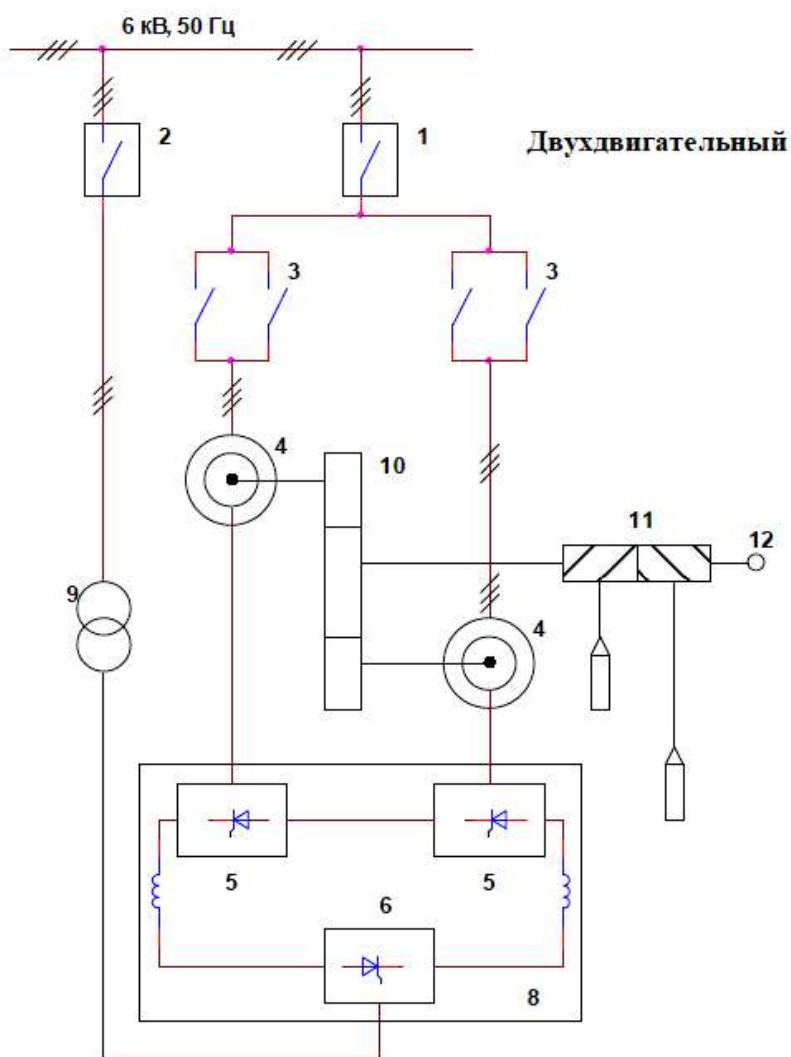


Рисунок 35 – Функціональна схема комплекту електропривода підйомної установки з двома двигунами за системою АТК

§4 Електропривод за системою ПЧ-АД

Загальна схема електропривода підйомної установки за системою ПЧ-АД представлена на рис. 36.

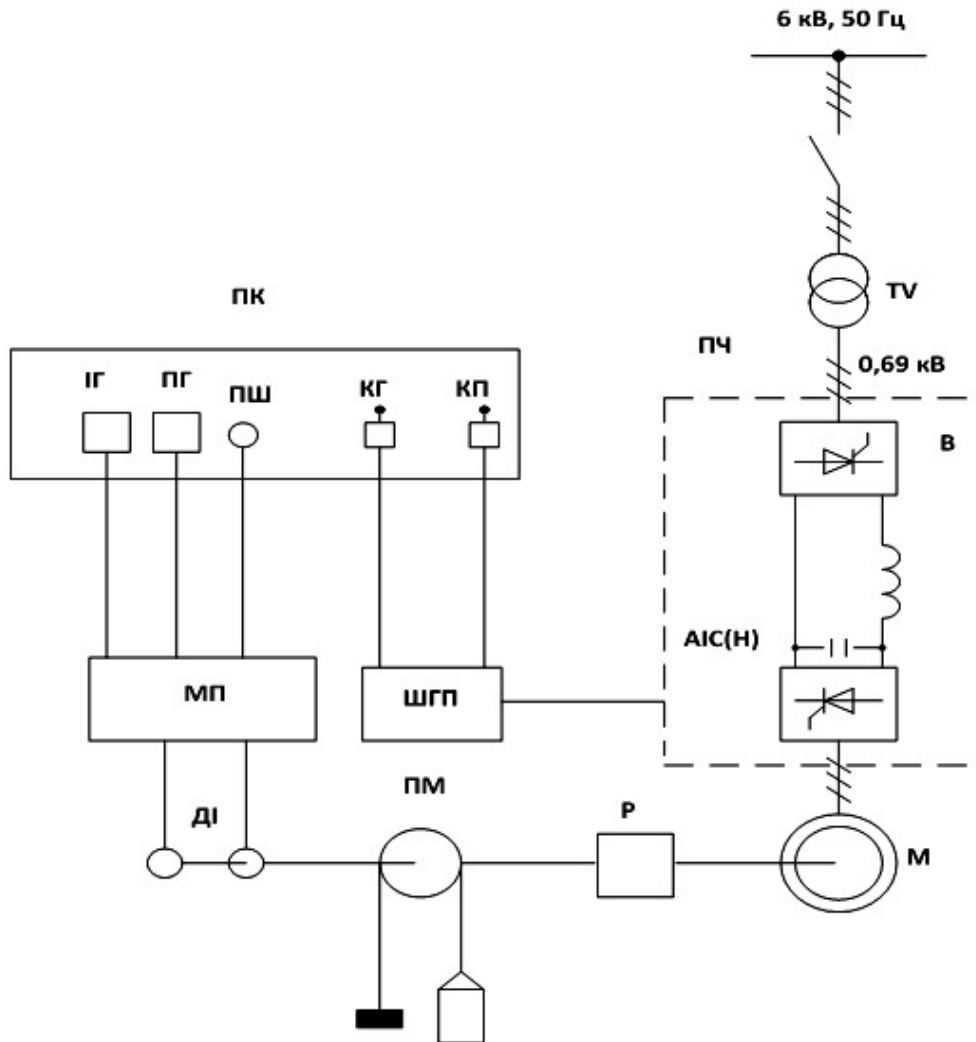


Рисунок 36 – Загальна схема електропривода підйомної установки за системою ПЧ-АД

Позначення й назва елементів:

TV – узгоджувачий трансформатор з мережею;

ПЧ – перетворювач частоти;

В – випрямляч;

АІС(Н) – автономний інвертор струму (напруги);

М – асинхронний короткозамкнений двигун;

Р – редуктор;

ПМ – підйомна машина;

ПК – пульт керування:

- ІГ – індикатор глибини підйому;
- ПГ – показчик глибини;
- ПШ – показчик швидкості;

- КГ – командоапарат гальма;
- КП – командоапарат привода;

МП – монітор підйому;

ШГП – шафа головного приводу;

ДІ – імпульсні датчики швидкості (датчики імпульсів).

§4 Електропривод за системою БПЧ-АД

Функціональна схема електропривода підйомної установки за системою БПЧ-АД представлена на рис. 37.

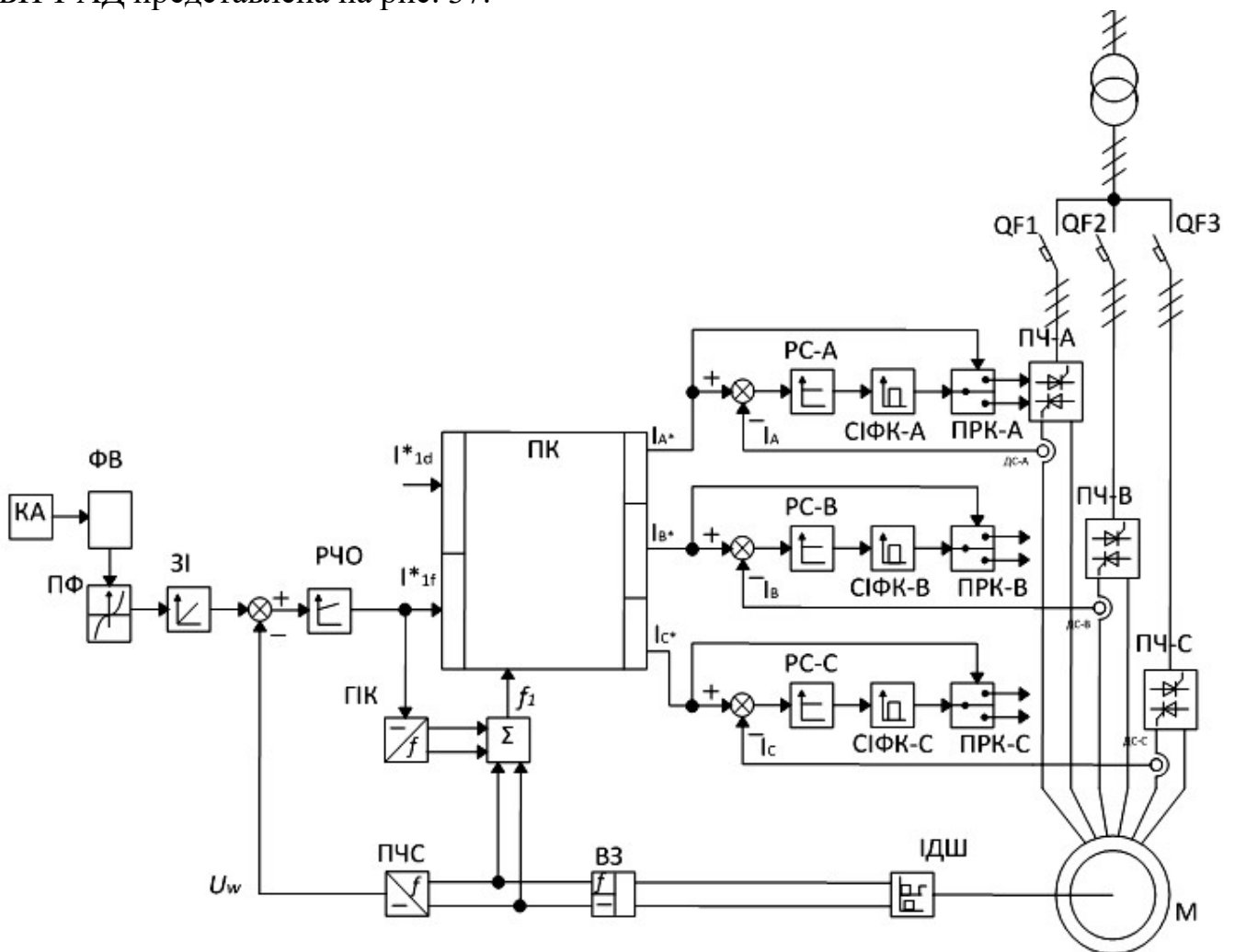


Рисунок 37 – Функціональна схема електропривода підйомної установки за системою БПЧ-АД

Позначення й функції елементів:

На вході: узгоджуючий трансформатор з мережею (стандартний: одна первинна обмотка, одна вторинна);

QF1...QF3 – автоматичні вимикачі;

ПЧ-А, ПЧ-В, ПЧ-С – вентильні групи БПЧ за трифазною мостовою схемою;

М – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором і розщепленою обмоткою статора;

ДС-А, ДС-В, ДС-С – датчики струму в фазах двигуна (формують зворотний зв'язок за струмом статора);

СІФК-А, СІФК-В, СІФК-С – системи імпульсно-фазового керування вентильними групами;
 ПРК-А, ПРК-В, ПРК-С – пристрої роздільного керування тиристорними мостами;
 РС-А, РС-В, РС-С – регулятори фазних струмів (пропорційні);
 КА – командоапарат (рукоять для оператора машиніста);
 ФВ – фазочутливий випрямляч (полярність і величина вихідної напруги визначається напрямком руху і величиною кута повороту рукоятки КА);
 ПФ – перетворювач функціональний (визначає закон регулювання напруги від частоти);
 ЗІ – задатчик інтенсивності першого порядку (визначає темп розгону і гальмування електроприводу);
 РЧО – регулятор частоти обертання двигуна (пропорційно-інтегруючий);
 ГІК – елемент завдання частоти струму ротора (функція АЦП);
 ІДШ – імпульсний датчик швидкості (енкодер);
 ВЗ – блок виділення знака в залежності від напрямку обертання двигуна;
 ПЧС – перетворювач частотного сигналу (функція ЦАП);
 ПК – перетворювач координат (аналог задаючого генератора). За сигналами постійного струму: уставки реактивної складової струму статора i_{1d}^* та активної складової i_{1q}^* (з виходу РЧО) та частоти струму f_l - формується трифазна система синусоїдальних напруг управління i_A^* , i_B^* , i_C^* .

§4 Сучасні схеми електроприводів на базі систем ТП-Д і БПЧ-СД

Приклад схеми електропривода й автоматички підйомної машини за системою ТП-Д представлена на рис. 38.

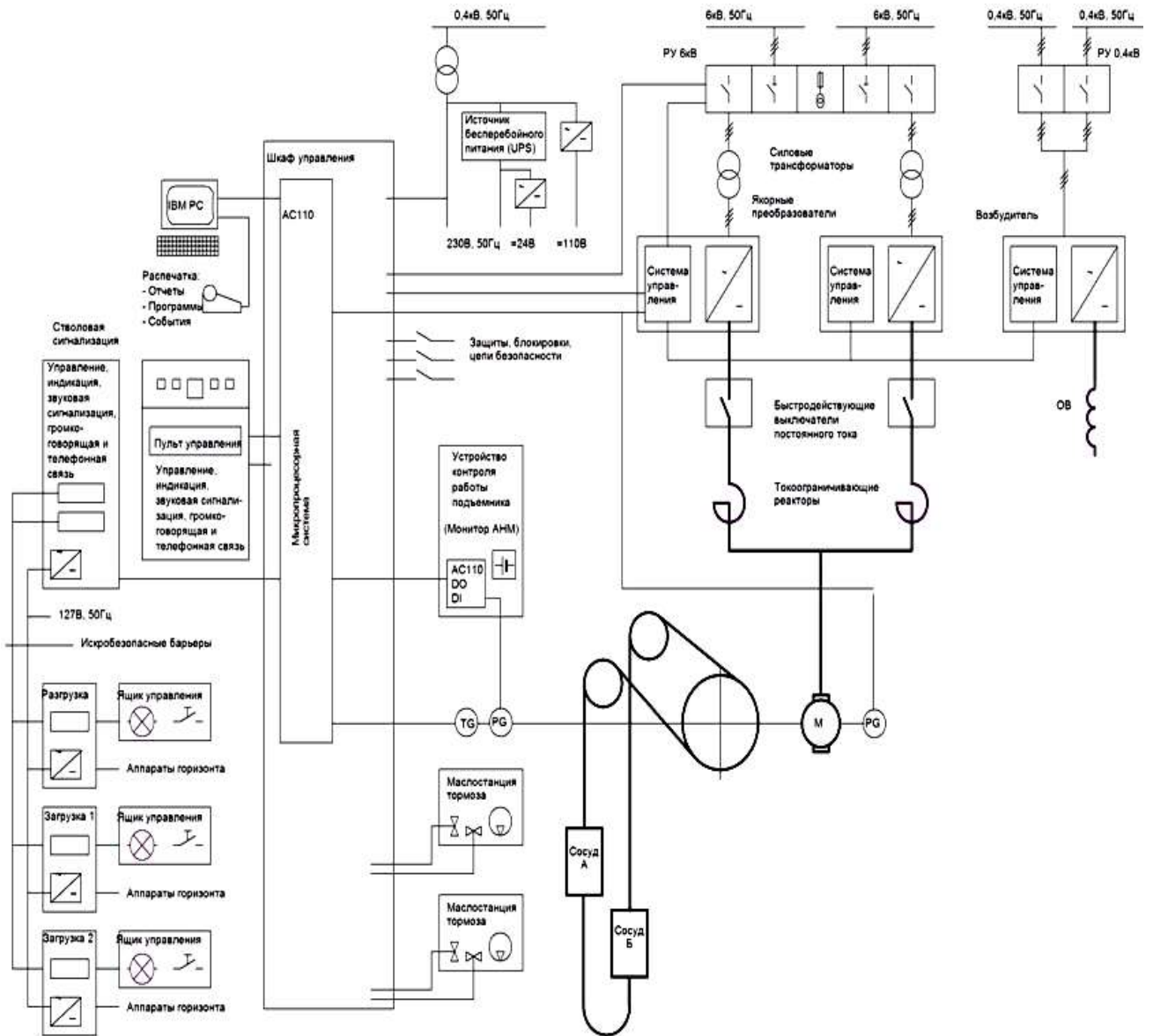


Рисунок 38 – Функціональна схема електропривода й автоматики підйомної машини за системою ТП-Д

Приклад схеми електропривода й автоматики підйомної машини за системою БПЧ-СД представлений на рис. 39.

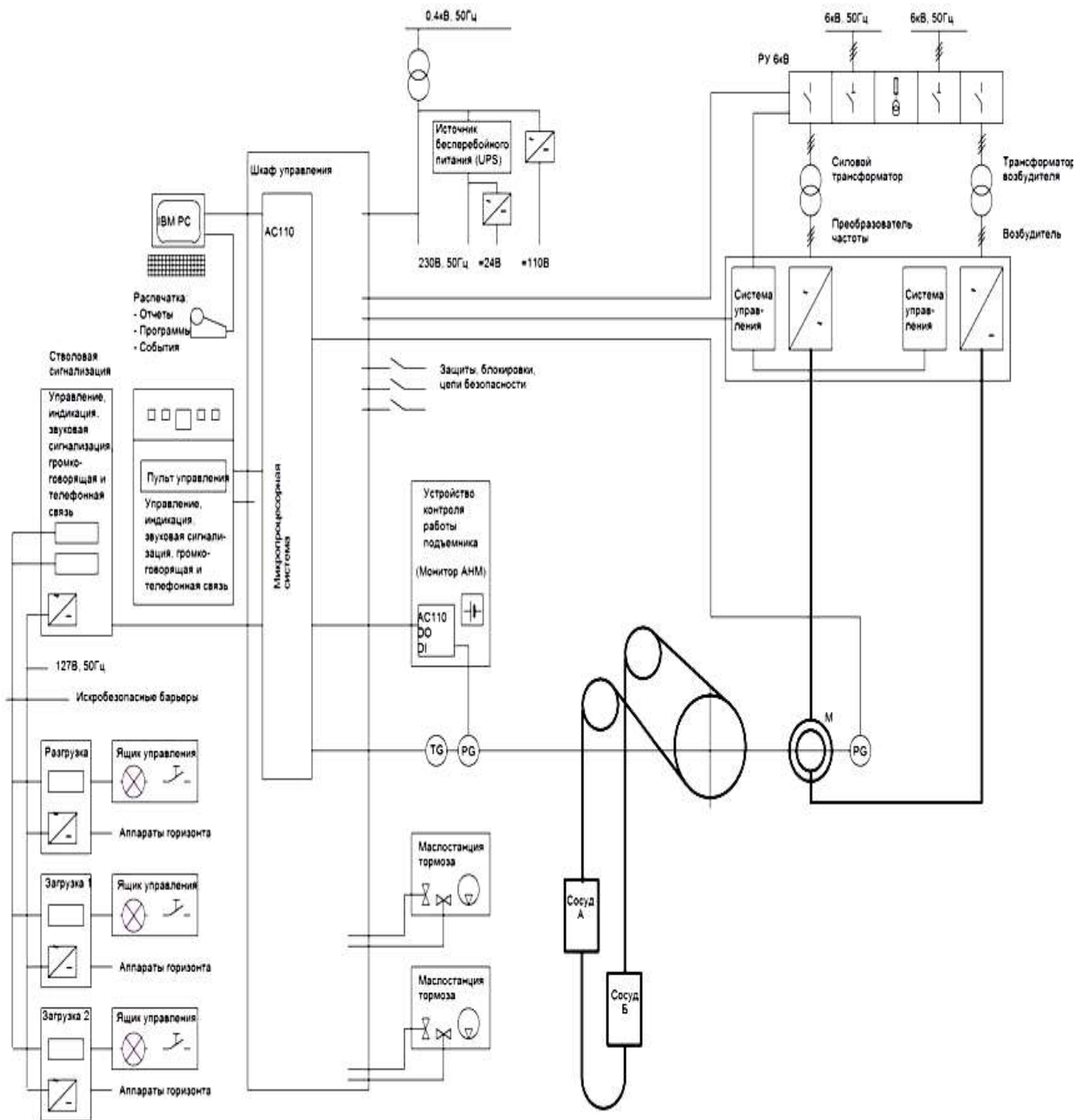


Рисунок 39 – Функціональна схема електропривода й автоматики підйомної машини за системою БПЧ-СД

Тема 4.2. Автоматичне керування електроприводом конвеєрних установок

§1 Загальні відомості

Стрічкові конвеєри є транспортними установками безперервної дії, тобто загрузка, транспортування й розвантаження конвеєрів відбувається без їх зупинки. Тому для них відсутнє поняття робочого циклу і, відповідно, немає швидкісних діаграм.

Основні вимоги до електроприводу:

- робота в тривалому режимі при перемінному навантаженні без реверсування напрямку вантажопотоку в рушійному й гальмівному режимах;
- регулювання швидкості тягового органу із забезпеченням постійного навантаження на робочій гілці конвеєра, що дозволяє підвищити енергоефективність використання установок, скоротити пробіг тягового органу й, отже, збільшити ресурс дорогої конвеєрної стрічки;
- обмеження прискорення при пуску допустимою величиною й усунення коливального динамічного навантаження, що забезпечує надійне зчеплення стрічки з барабаном і транспортуємого вантажу зі стрічкою;
- в разі застосування регульованих електроприводів, що забезпечують процеси плавного пуску, регулювання швидкості стрічки, обмеження динамічних навантажень, діапазон регулювання швидкості має бути не менше 10 : 1.

§2 Електропривод за схемою ППП

Функціональна схема нерегульованого електропривода конвеєрної установки з пристроєм плавного пуску ППП наведена на рис. 40.

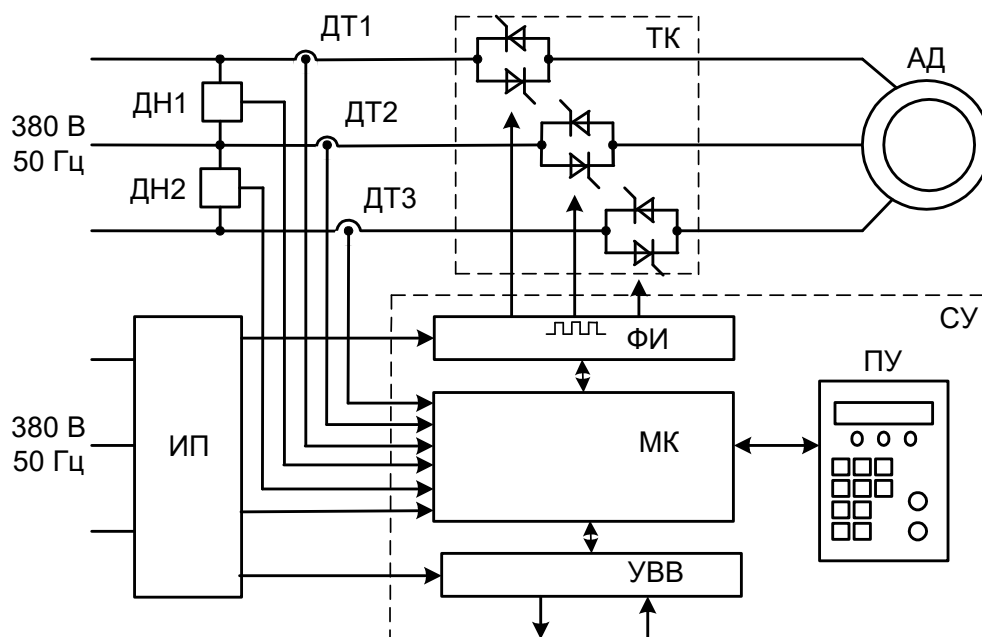


Рисунок 40 – Функціональна схема нерегульованого електропривода конвеєрної установки з пристроєм плавного пуску ППП

Позначення й функції елементів:

АД – асинхронний короткозамкнений двигун;

ТК – тиристорний комутатор (за схемою ТРН);

СУ – система управління:

- ФИ – формувач імпульсів управління тиристорами;
- МК – мікроконтролер;
- УВВ – пристрій ввода-виводу;
- ПУ – пульт управління;

ИП – джерело живлення;

ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики струму статора (призначені для контролю та регулювання пускового струму та захисту від значних струмів, зокрема КЗ);
 ДН1, ДН2 – датчики напруги (призначені для захисту від перенапруг та регулювання напруги на статорній обмотці двигуна).

§3 Електропривод за системами АВК та АТК

Функціональна схема низьковольтного електропривода конвеєрної установки за системою АВК (комплектний перетворювач випрямляч-інвертор КВПІ) наведена на рис. 41.

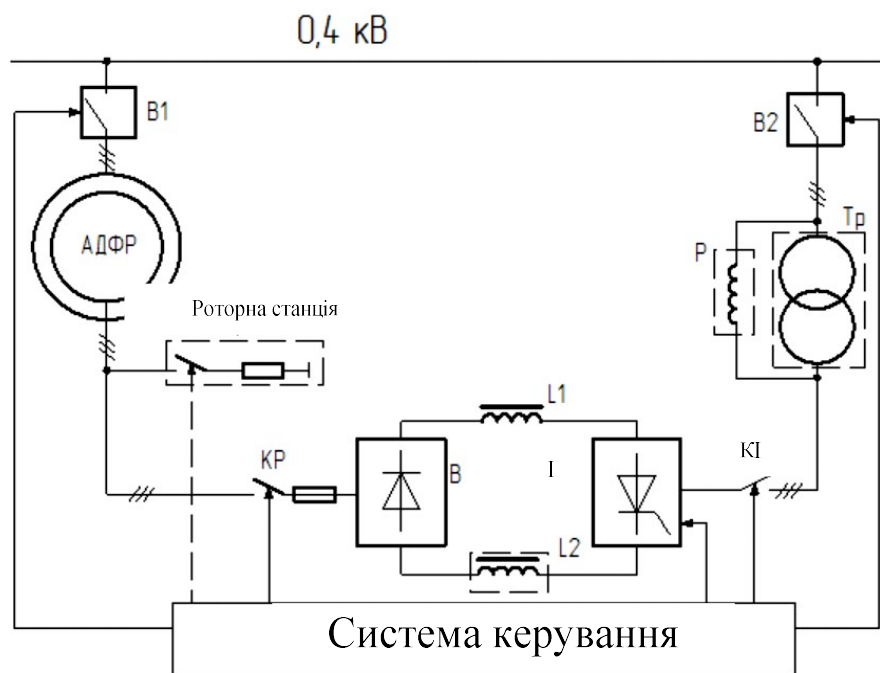


Рисунок 41 – Функціональна схема низьковольтного електропривода конвеєрної установки за системою АВК

Позначення й назва елементів:

В1, В2 – високовольтні вимикачі;

АДФР – асинхронний двигун з фазним ротором;

В – нерегульований випрямляч на діодах;

І – регульований інвертор на тиристорах;

L1, L2 – згладжуючі реактори (один або два);

КР – комутатор в роторному колі;

КІ – комутатор в колі інвертора;

Тр – узгоджуючий трансформатор або струмообмежувальний реактор Р.

Система управління – мікропроцесорна.

Роторна станція – резервна або для запуску привода значної потужності.

Функціональна схема високовольтного електропривода конвеєрної установки за системою АВК (комплектний перетворювач випрямляч-інвертор КВПІ) представлена на рис. 42.

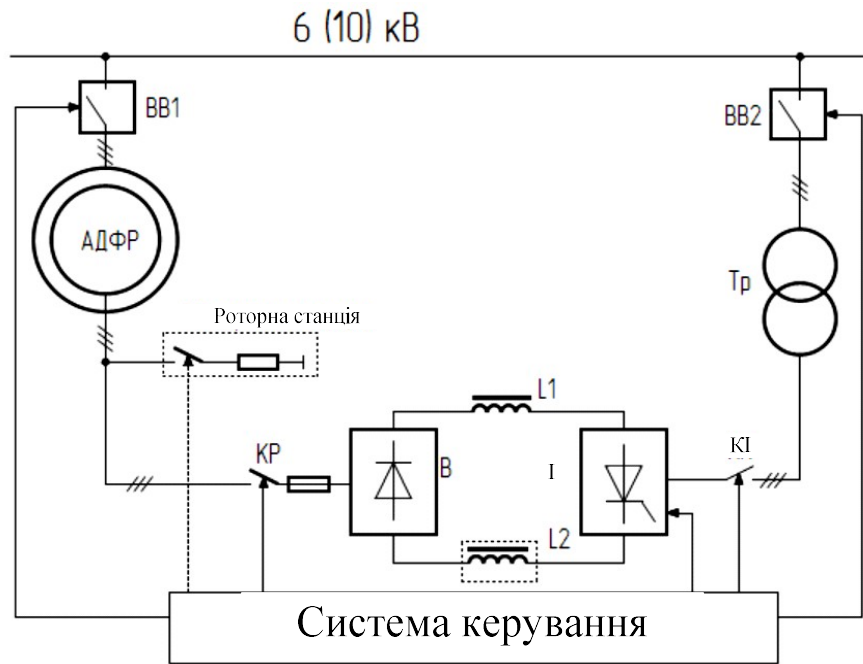


Рисунок 42 – Функціональна схема низьковольтного електропривода конвеєрної установки за системою АВК

Функціональна схема високовольтного електропривода конвеєрної установки за системою АТК (комплектний перетворювач випрямляч-інвертор КВП) представлена на рис. 43

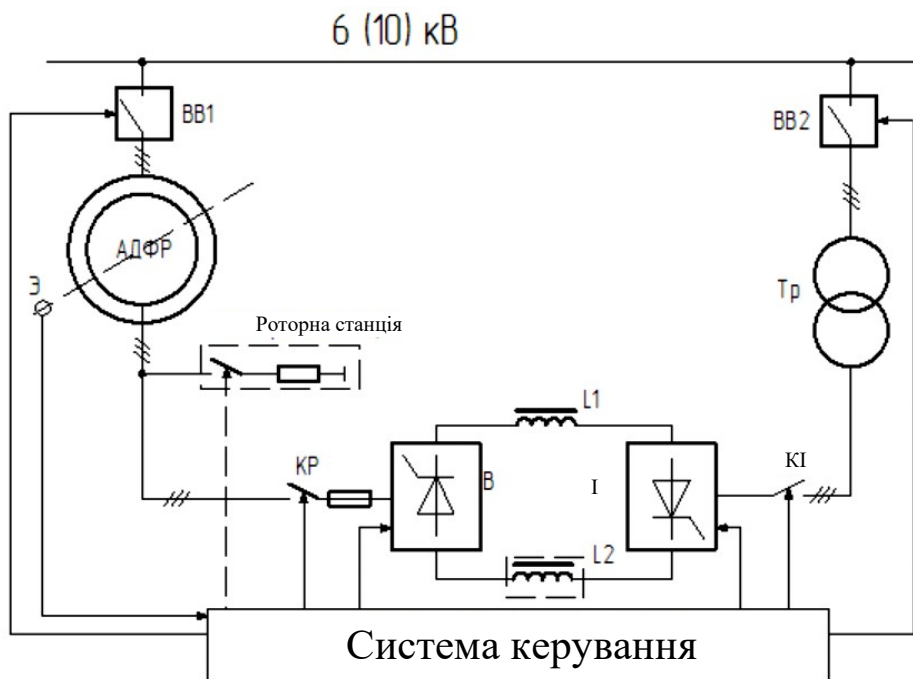


Рисунок 43 – Функціональна схема високовольтного електропривода конвеєрної установки за системою АТК

§4 Електропривод за системою ПЧ-АД

Типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода конвеєрної установки з АІН представлена на рис. 44.

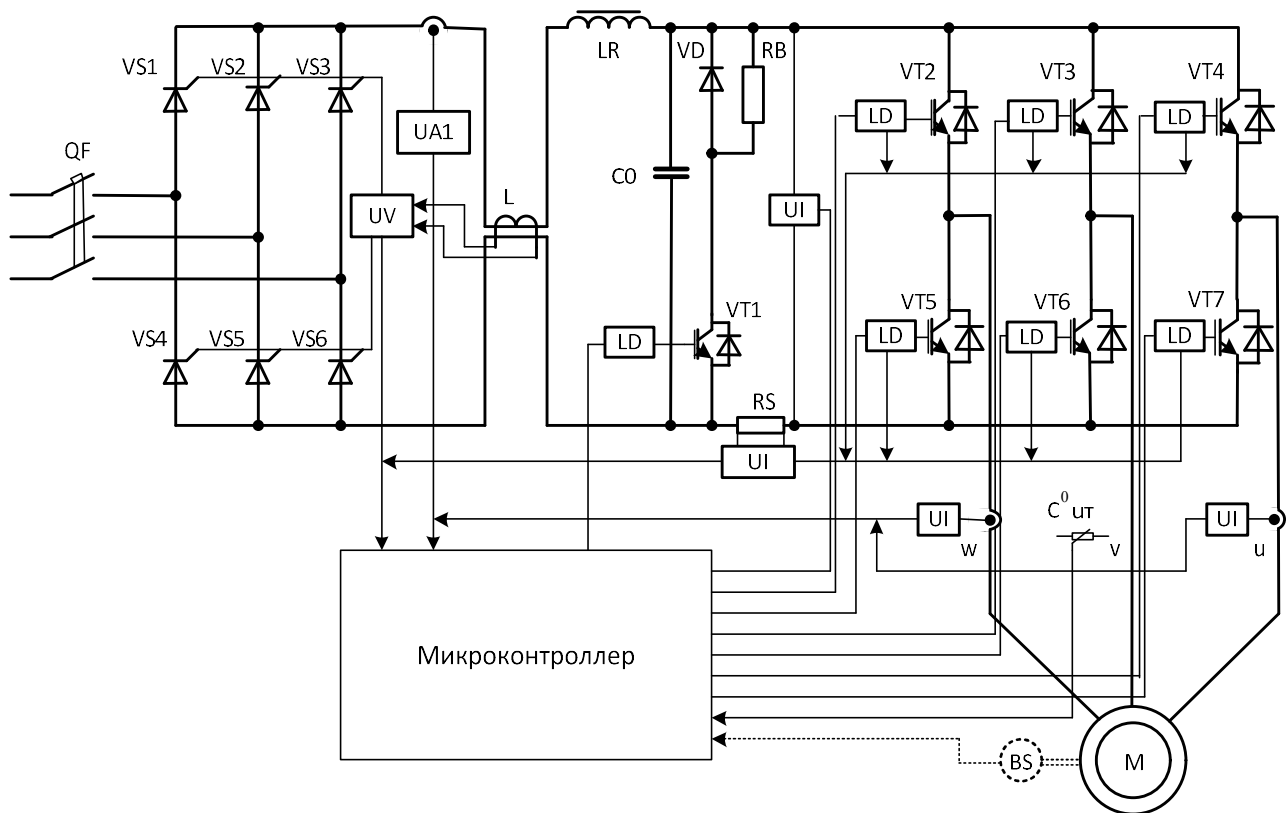


Рисунок 44 – Типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода конвеєрної установки з АІН

Позначення й назва елементів:

QF – автоматичний вимикач;

VS1...VS6 – тиристори випрямляча;

UV – датчик напруги з трансформатором напруги L в колі постійного струму;

UA1 – датчик струму;

LR_CO – індуктивно-емнісний фільтр в ланці постійного струму;

RB – гальмівний резистор;

VT1 – транзисторний ключ управління гальмівним резистором;

VT2...VT7 – транзисторні IGBT-модулі автономного інвертора напруги;

LD – драйвери управління транзисторами;

UI – датчики напруги або струму (в залежності від місця підключення);

UT – датчик температури двигуна;

M – асинхронний короткозамкнений двигун;

BS – датчик швидкості (може бути або ні, в залежності від потрібного діапазону регулювання швидкості).

Функціональна схема безтрансформаторного високовольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода конвеєрної установки з АІС представлена на рис. 45.

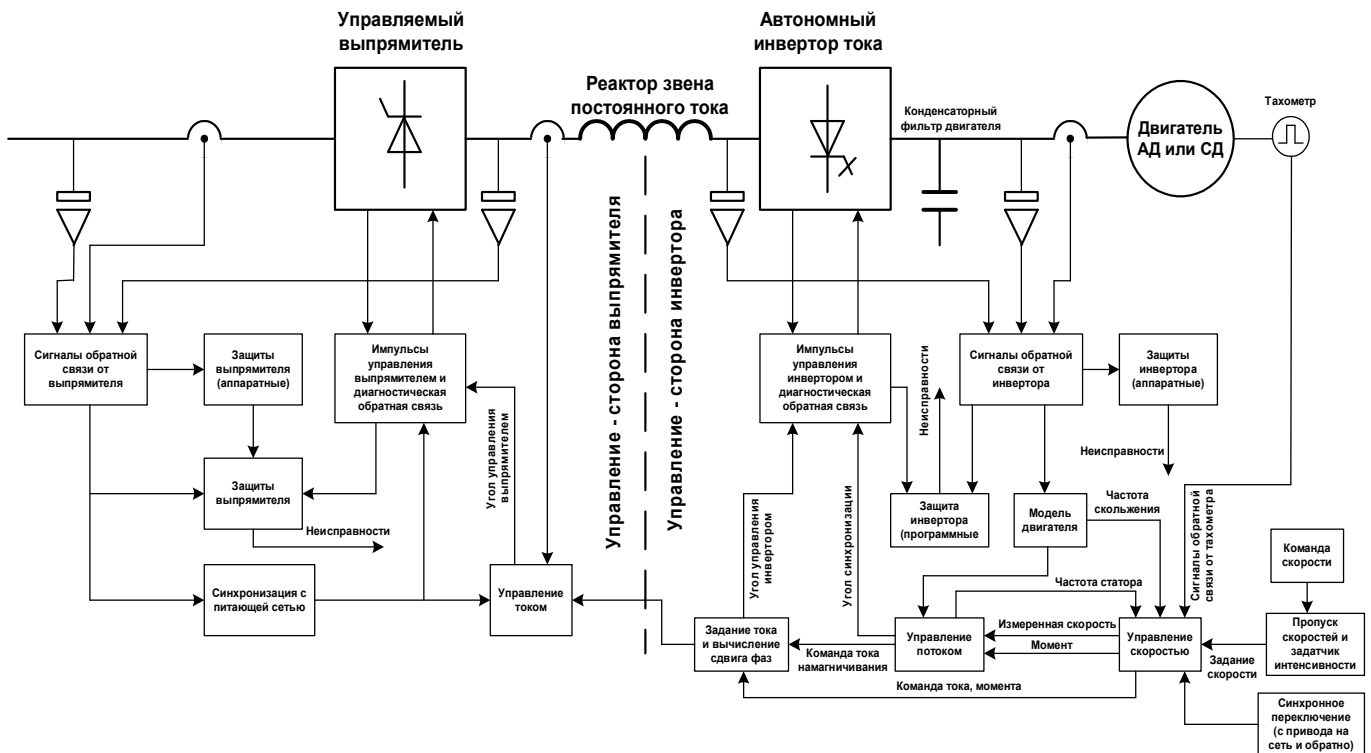


Рисунок 45 – Функціональна схема безтрансформаторного високовольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода конвеєрної установки з АІС

Конденсаторний фільтр – джерело реактивної потужності для двигуна (компенсатор споживання реактивної потужності з мережі живлення).

Діапазон зміни частоти струму статора – 0,2.. 70 Гц.

Регулювання напруги на обмотці статора – 0...6000 В або 0...10000 В.

Метод управління отримав назву пряме векторне управління.

Тахометр (датчик швидкості) непотрібен при частоті більшої 6 Гц і початковим пусковим моментом менше 100% від номінального. Його необхідно встановлювати при частоті 0,2...6 Гц й пусковим моментом до 150% від номінального.

Тема 4.3. Автоматичне керування електроприводом турбомеханізмів

§1 Загальні положення

Турбомеханізми складають групу установок, обслуговуючих необхідний технологічний процес, тому головною загальною вимогою до електроприводу є економічність й надійність його роботи.

До турбомеханізмів відносяться вентилятори, насоси, компресори.

Електропривод насосних установок має додаткові вимоги:

- діапазон регулювання швидкості до 4 : 1;
- перевантажувальна здатність не нижче 1,5;

- плавний пуск насосного агрегату і розгін до заданої швидкості;
- гальмування вільним вибігом.

Особливістю роботи турбомеханізмів є ступенева функціональна залежність статичного моменту навантаження від їх кутової швидкості

$M_c = f(\omega^n)$, де показник ступеня n визначається типом установки:

$n = 2$ – для вентиляторів;

$n \cong 2,5$ – для насосів;

$n \cong 1,25$ – для турбокомпресорів.

§1 Електропривод за системою АВК

Спрощена функціональна схема високовольтного електропривода вентиляторної установки за системою АВК представлена на рис. 46.

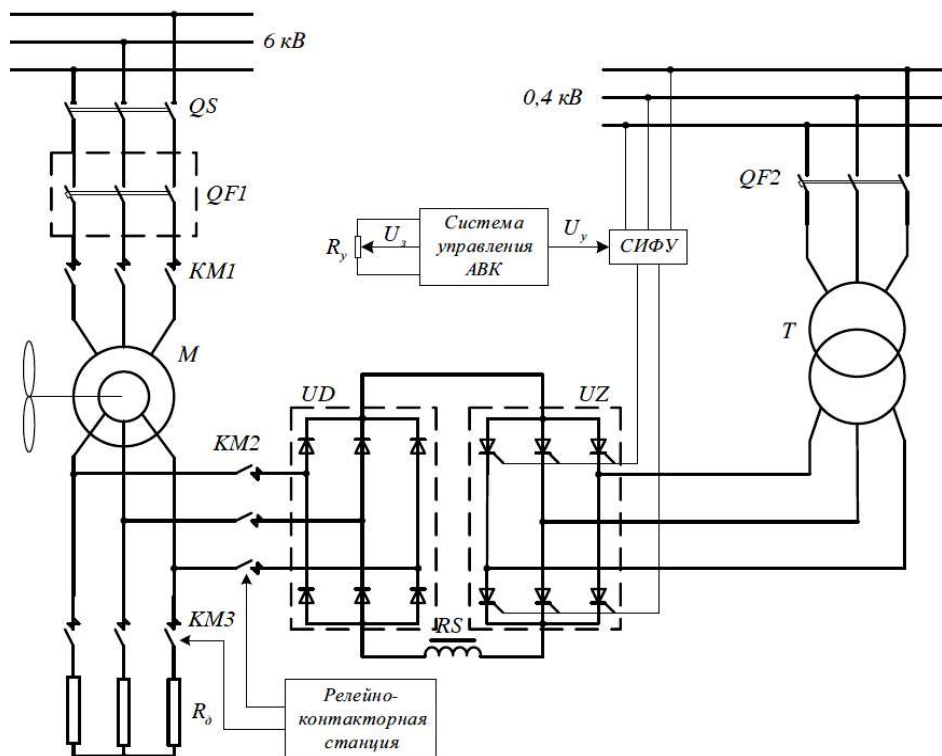


Рисунок 46 – Спрощена функціональна схема високовольтного електропривода вентиляторної установки за системою АВК

Позначення й назва елементів:

QS – роз'єднувач;

$QF1$ – високовольтний вимикач;

$QF2$ – автоматичний вимикач (низьковольтний);

$KM1$ – контактор підключення двигуна до мережі;

M – асинхронний двигун з фазним ротором;

UD – некерований випрямляч на діодах (схема трифазна мостова);
 UZ – керований інвертор на тиристорах (схема трифазна мостова);
 LR – згладжуючий реактор;
 T – узгоджуючий трансформатор з мережею;
 $KM2$ – контактор підключення каскаду до ротора двигуна;
 $KM3$ – контактор підключення додаткового (пускового) трифазного опору Rd ;
 Ry – потенціометр завдання потрібної швидкості вентилятора.

§2 Електропривод за системою ПЧ-АД

Загальна схема асинхронного частотно-регульованого електропривода вентилятора представлена на рис. 47.

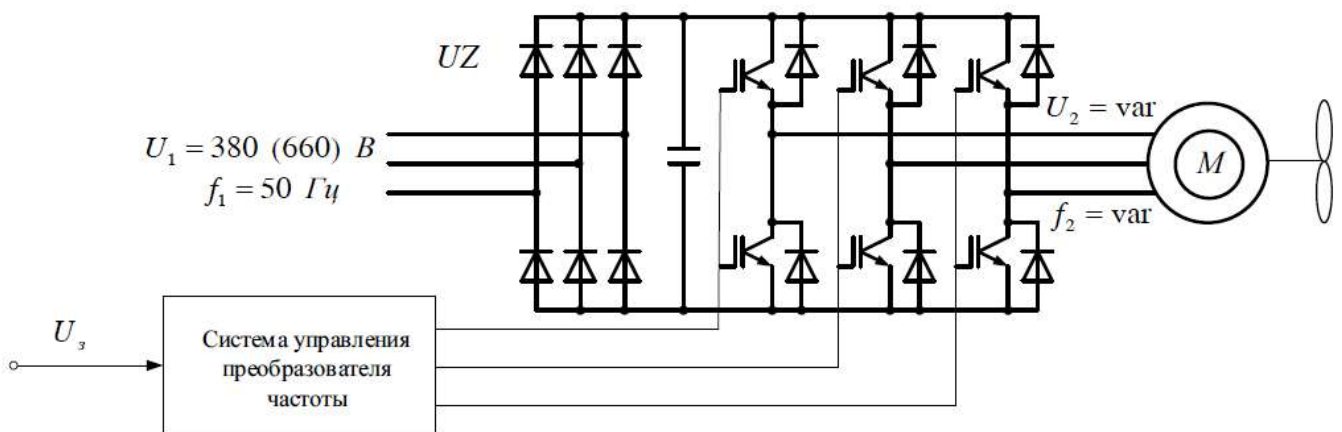


Рисунок 47 – Загальна схема асинхронного частотно-регульованого електропривода вентилятора

Позначення й назва елементів:

M – асинхронний короткозамкнений двигун;
 UZ – перетворювач частоти з ланкою постійного струму на базі IGBT-модулів за схемою АІН.

Функціональна схема двохтрансформаторного асинхронного частотно-регульованого електропривода насоса з високовольтним двигуном й низьковольтним АІН в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі представлена на рис. 48.

Позначення й назва елементів:

$T1$ – понижуючий трансформатор 6/0,4;
 KM – контактор підключення всієї системи електроприводу;
 UZ – низьковольтний перетворювач частоти з ланкою постійного струму на базі транзисторних IGBT – модулів за схемою АІН;
 $T2$ – підвищувальний трансформатор 0,4/6;
 M – асинхронний короткозамкнений двигун;
 H – насосна установка;
 $ДД$ – датчик тиску.

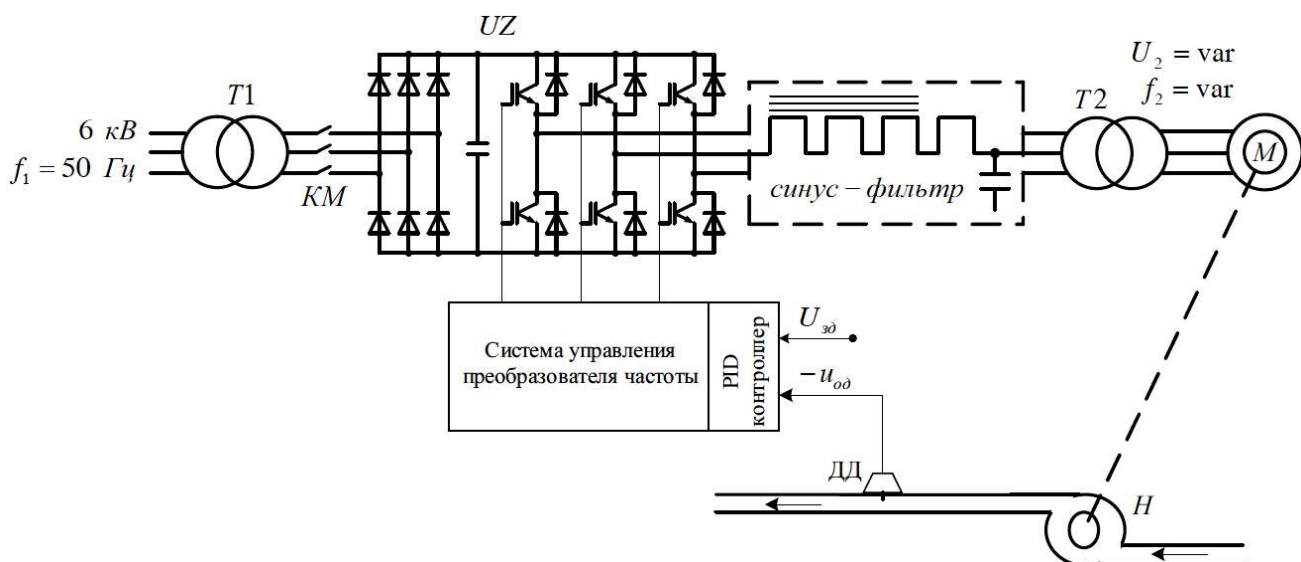


Рисунок 48 – Функціональна схема двохтрансформаторного асинхронного частотно-регульованого електропривода насоса з високовольним двигуном й низьковольтним АІН в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі

Функціональна схема безтрансформаторного високовольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода насосної установки з АІС в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі представлена на рис. 49.

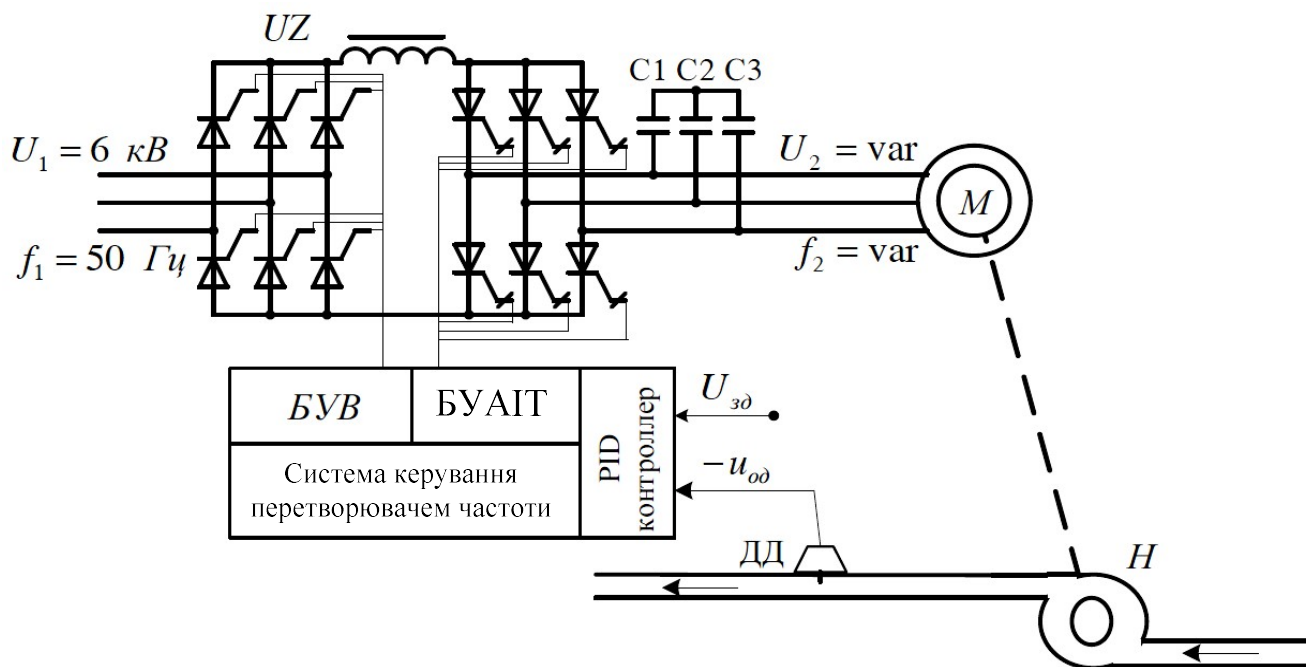


Рисунок 49 – Функціональна схема безтрансформаторного високовольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода насосної установки з АІС в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі

Позначення й назва елементів:

UZ – високовольтний перетворювач частоти з ланкою постійного струму;

БУВ – блок управління випрямлячем (на звичайних тиристорах);
 БУАІС – блок управління автономним інвертором струму АІС (на базі *GTO*-тиристорів);
M – високовольтний асинхронний короткозамкнений двигун;
H – насосна установка;
 ДД – датчик тиску.

Функціональна схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода насосної установки з АІН в системі автоматичної стабілізації рівня рідини наведена на рис. 50.

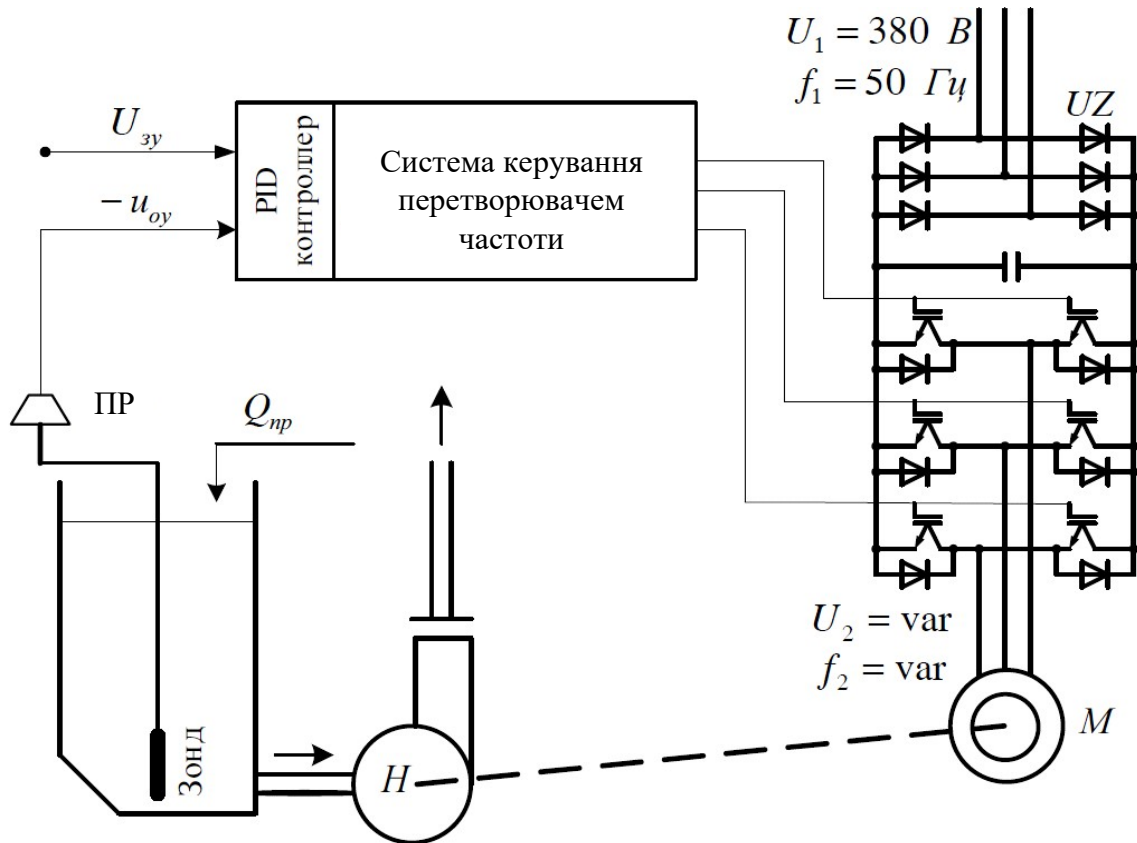


Рисунок 50 – Функціональна схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода насосної установки з АІН в системі автоматичної стабілізації рівня рідини

Позначення й назва елементів:

UZ – низьковольтний перетворювач частоти з ланкою постійного струму;
M – високовольтний асинхронний короткозамкнений двигун;
H – насосна установка;
Q – приток рідини;
 ПР – перетворювач рівня рідини в резервуарі

Список використаних джерел

Базова

1. Величко Т.В., Родькин Д.И. Теория электропривода. Часть 1. Механика и характеристики двигателей в электроприводе. / Учебное пособие. – Кременчуг: КПИ, 1999. – 237 с. (pdf)
2. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1. (djvu)
3. Johnson M.A., Moradi M.H. PID Control. New Identification and Design Methods. — London: Springer, 2005. —544 p.
3. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2. (djvu)
4. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993 – 494 с.: іл (djvu)
5. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач. / ОНПУ Одеса: Поліграф, 2006 – 408 с. (djvu).
6. Радимов С.Н. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Одеса. 2007. – 39 с. (djvu)

Допоміжна

1. Колб Ант.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навч. посібник. - Д.:НГУ, 2006. - 511 с.
2. Шульга О.В. Автоматизоване керування електроприводами: навчальний посібник. – Полтава: ПолНТУ, 2007 – 293 с.
3. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод : навч. посіб. / Б. О. Баховець. – Рівне : НУВГП, 2010. 238 с
4. . О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, В.В. Козирський, В.Я. Бунько, В.Ю. Рамш; За ред. О.Ю. Синявського. Електропривод та автоматизація – К.: ФОП Ямчинський О.В. 2019. 619с.