

**ЛІТЕРАТУРА**



**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА**

**Міністерство освіти і науки України**

**Тернопільський національний технічний університет  
Імені Івана Пулюя**

Кафедра систем електроспоживання та  
комп'ютерних технологій в  
електроенергетиці

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

з дисципліни «**Основи електроприводу**»  
на тему

**“Електропривід насосної станції  
для системи водопостачання”**

*для студентів за напрямом підготовки  
141 «Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка»  
всіх форм навчання*

Тернопіль, 2023



**Міністерство освіти і науки України**

Тернопільський національний технічний університет  
Імені Івана Пулюя

*Кафедра*  
електричної інженерії

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до виконання курсового проекту

з дисципліни «**Основи електроприводу**»  
на тему

**“Електропривід насосної станції  
для системи водопостачання”**

*для студентів за напрямом підготовки*  
*141 «Електроенергетика, електротехніка*  
*та електромеханіка»*  
*всіх форм навчання*

Тернопіль, 2023

**Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Основи електроприводу» на тему “Електропривід насосної станції для системи водопостачання” для студентів денної і заочної форм навчання напряму за напрямом підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».**

Укладачі: Андрійчук В.А, Філюк Я.О., Наконечний М.С. – Тернопіль:  
ТНТУ ім. І. Пулюя, 2023. – 66 с.

Укладач: д.т.н., проф.  
к.т.н., ст. вик.  
к.т.н., ст. вик.

Андрійчук В.А  
Філюк Я.О.  
Наконечний М.С.

Рецензент: к.т.н., доцент

Костик Л.М.

Розглянуто й схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії.  
Протокол № 1 від 25 серпня 2023 року.

Розглянуто й рекомендовано до друку на засіданні науково-методичної комісії факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.  
Протокол № 1 від 30 серпня 2023 року

## ВСТУП

Насоси і насосні станції є основними елементами систем водопостачання і водовідведення. Технічні показники насосних станцій визначають надійність і економічну ефективність подачі і відведення води населенню, промисловим і комунально-побутовим підприємствам. У той же час насосні станції є основними споживачами електроенергії в системах водопостачання і водовідведення. Тому при проектуванні насосних установок питання енергозбереження і зменшення питомих витрат електроенергії на подачу і відведення води стоїть на першому місці. Метою даного курсового проекту є здобуття й закріплення студентами знань з проектування сучасних систем електроприводу, автоматизованих за допомогою тиристорних перетворювачів напруги і частоти струму (ТПЧ) та програмованих логічних контролерів (ПЛК).

Сучасна тенденція розвитку електроприводу полягає в заміні традиційно нерегульованого асинхронного електроприводу насосів і вентиляторів регульованим електроприводом, оснащеним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором (АДКЗ) з частотним регулюванням. Регулювання подачі насосів і вентиляторів частотою обертання двигуна дозволяє зменшити втрати енергії на 20 – 30% проти регулювання кранами, засувками, шиберами.

Вихідними даними для проектування насосної станції є добові і річні графіки споживання води населенням, комунально-побутовими і промисловими підприємствами селища чи міста для якого виконується проект, характеристики джерела (річка, озеро чи підземні води, чи свердловина), рельєф місцевості біля місця відбору води, характеристики води (чистота, мутність, хімічний склад), характеристики водогінної розподільної системи (матеріал і діаметри труб, їх довжина і уклін до горизонту, найнижча і найвища точки відбору). За цими вихідними даними інженери-гідравліки виконують розрахунки подачі і напору (тиску), під яким необхідно подавати воду в водогінну систему. Вони ж обирають з каталогів типорозміри насосів, які повинні забезпечити розрахункові значення подачі і напору при вибраних характеристиках системи.

Ці дані є вихідними даними для проектування системи електропостачання і електроприводу насосної станції.

Отже, вихідними даними для проектування електроприводу насосної установки є технологічна схема системи водопостачання з числовими значеннями параметрів її елементів, за якими визначають:

- номінальні значення подачі і напору в системі;
- визначають тип і типорозміри насосів та їх напірні характеристики;
- розраховують електромеханічні характеристики насосного агрегату;
- складають схему живлення і захисту електродвигуна і розраховують її елементи;
- визначають спосіб регулювання подачі та частоти обертання насоса;
- вибирають комплектну апаратуру системи живлення, комутації та програмного керування насосною установкою;
- розраховують параметри програми налагодження системи керування на енергозберігаючі режими роботи.

# І ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

## 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ. НАСОСИ І НАСОСНІ СТАНЦІЇ

### Загальні відомості про системи водопостачання

Потужність і параметри регульованого електроприводу системи водопостачання визначаються параметрами системи. Система водопостачання в загальному випадку – це комплекс споруд і пристроїв: споруда і пристрій для відбору води з джерела, насосна установка, трансформаторна підстанція або розподільчий щит, напорний трубопровід, очисні споруди, резервуар чистої води і водорозбірна мережа. В окремих випадках деякі з цих споруд непотрібні, наприклад, при відборі води з артезіанських свердловин не потрібні очисні споруди.

Параметри системи водопостачання залежать від багатьох факторів, але основними з них є джерело води, об'єм водоспоживання і рельєф місцевості джерела і споживання. Всі джерела води, які використовують для водопостачання можна поділити на дві групи: поверхневі – ріки, озера, моря і підземні – артезіанські і ґрунтові води [3]. Вибір джерела водопостачання є надзвичайно важливою задачею. Її вірне вирішення дає гарантію на отримання необхідних об'ємів води протягом тривалого проміжку часу, на надійність і безперервність роботи системи водопостачання.

В сучасних умовах природні водні ресурси України не можна вважати необмеженими. Інтенсивна господарська діяльність і розвиток промисловості настільки погіршили екологічний стан малих і середніх річок України, що зробили їх непридатними для водоспоживання. В цих умовах актуальною стає задача ширшого використання підземних артезіанських вод. Даний курсовий проект направлений на вирішення однієї з задач цієї галузі – **створення типового регульованого електроприводу для серії свердловинних насосів типу ЕЦВ потужністю від 1,1 кВт до 130 кВт.**

Електропривід “прив’язаний” до найпростішої автономної системи водопостачання, яка складається з підземного джерела, свердловинного відцентрового насоса, конструктивно з’єданого з електродвигуном, напірного трубопроводу і водонапірної башти з резервуаром відповідного об’єму.

Об’єм водоспоживання визначається видом населеного пункту – ферма, село, селище, місто. Якщо місто, то наскільки індустріалізоване, який характер забудови – малоповерхова чи багатоповерхова, норми питомого водоспоживання, норми протипожежного резерву. Наприклад, для населених пунктів, де водокористування передбачено з водорозбірних колонок, питома середньодобова витрата води на 1-го мешканця приймається рівною 30-50 л. Для великих міст, забудованих будинками з внутрішнім водоогоном і гарячим централізованим опаленням добова норма водоспоживання складає 230 – 350 л. Враховують також витрати води на промислові і побутові потреби промислових і комунальних підприємств і на гасіння пожеж. Для проектування системи водопостачання необхідно знати не тільки норми водоспоживання, але й графіки погодинного споживання протягом доби і помісячного споживання протягом року. Врахування нерівномірності добового споживання дозволяє зменшити кількість одночасно працюючих насосів, впровадити програмне регулювання подачі. Діючими нормативними документами встановлені коефіцієнти добової нерівномірності подачі  $K_{доб\ max} = 1,1 - 1,3$ ;  $K_{доб\ min} = 0,7 - 0,9$ . На рис.1.1 зображена добова діаграма водоспоживання реального міста.

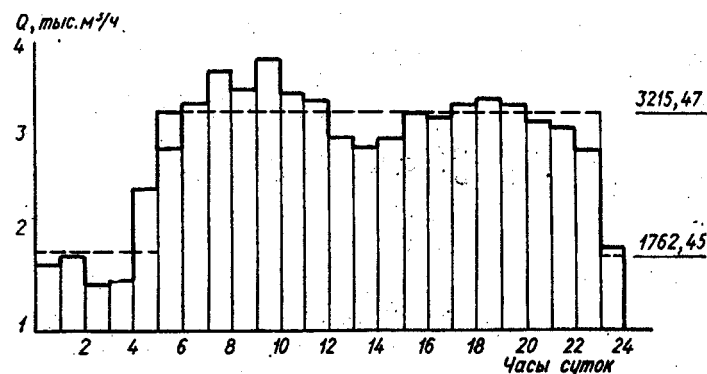


Рисунок 1.1 – Типова добова діаграма водоспоживання середнього за чисельністю населеного пункту з промисловими і комунальними підприємствами



Типовим для добової діаграми водоспоживання будь-якого міста є те що з неї видно інтервали часу найбільшого і найменшого споживання, а значить і години найбільшої і найменшої **подачі води** у водорозбірну мережу. Це дає можливість розрахувати потужність насосних установок і межі регулювання подачі. Якщо орієнтуватись на діаграму рис.1.1, мінімум водоспоживання дорівнює 0,42 максимального. Логічно в проекті прийняти діапазон регулювання подачі від  $1,0Q_{ном}$  до  $0,42 Q_{ном}$ .

Даний курсовий проект не прив'язаний до систем водопостачання конкретних населених пунктів. Він орієнтований на найпростішу автономну систему з водопостачанням від свердловини, схема якої зображена на рис. 2.1. Найпростіша система водопостачання складається з джерела, насосної установки, башти з резервуаром (баком), напірного трубопровода, який з'єднує насос з резервуаром і водорозподільної мережі (на схемі не показана).

Об'єктом керування в системі водопостачання є насос. В системах водопостачання застосовують відцентрові насоси. У відцентрових насосах рідина переміщується під дією відцентрової сили, створюваної робочим колесом, яке приводиться в обертовий рух електродвигуном. Є два види свердловинних відцентрових насосів – насоси з електродвигуном над свердловиною і насоси з погружним (глибинним) електродвигуном. Даний курсовий проект орієнтований на насоси типу ЕЦВ з погружним асинхронним електродвигуном. Загальний вигляд насоса ЕЦВ зображено на рис. 3.1. Насоси ЕЦВ мають наступні технічні характеристики:

- діаметри: 4", 5", 6", 8", 10", 12";
- діапазон подач: 1,5...270 м<sup>3</sup>/год;
- діапазон напорів: до 400 м ;
- електродвигун ПЕДВ, потужність 1,1...130 кВт.

Структура умовного позначення типорозмірів насоса ЕЦВ

**ЕЦВ X – XX – XXX:** X - внутрішній діаметр обсадної труби свердловини в дюймах (25,4 мм); XX – номінальна подача в м<sup>3</sup>/год; XXX – номінальний напір в м. (наприклад, **ЕЦВ 8 – 25 – 150**).

## 2 ВІДЦЕНТРОВИЙ НАСОС ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

### 2.1 Основні поняття і визначення

Насосами називають машини, призначені для створення потоку рідини для її переміщення. Всі насоси поділяють на дві основні групи: динамічні і об'ємні. У динамічних насосах рідина під дією гідродинамічних сил переміщується у камері, постійно з'єднаній зі входом і виходом насосу. До динамічних насосів належать **відцентрові насоси**, які є основними в системах водопостачання, водяного опалення і каналізації. Насос, конструктивно об'єднаний з двигуном на одній рамі називають **насосним агрегатом**, а насосний агрегат, оснащений комплектом електрообладнання, яке забезпечує роботу насоса, називають **насосною установкою** [1]. Основними показниками роботи насоса є подача і напір. **Подача** (об'ємна) – це об'єм рідини, що подається насосом за одиницю часу. В системі SI -  $m^3 / c$ , у практиці  $m^3 / год$  або  $л / c$  для малих насосів. **Напір** – це тиск рідини під яким вона переміщається в водоводі. Одиниця напору в системі SI – Па (Паскаль), у практиці – метр водяного стовпа.  $10 \text{ м в. ст.} = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}$ . Повну інформацію про показники насоса дає характеристика насоса – графіки залежності напору, потужності, ККД від подачі при номінальній частоті обертання робочого колеса, номінальній в'язкості і густині води на вході в насос.

За державним стандартом маркування серійних насосів здійснюється за таким принципом: на першому місці стоїть літера або 2-3 літери, які означають марку (тип) насоса. Далі через тире або косу риску стоять два числа – подача і напір. Наприклад, консольний відцентровий насос з подачею  $125 \text{ м}^3 / год$  і напором 30 м замаркований так: **К 125 – 30** або **К 125/30**. Відцентрові насоси з двостороннім входом маркуються літерою **Д**, відцентрові вертикальні насоси – літерою **В**. Наприклад, свердловинний насос з погружним двигуном має позначення **ЭЦВ** з трьома числами – **ЭЦВ 8-25-150**. Перша цифра показує

діаметр обсадної труби скважини в дюймах, наступні два числа – подачу і напір відповідно.

## 2.2 Подача, напір і потужність відцентрових насосів

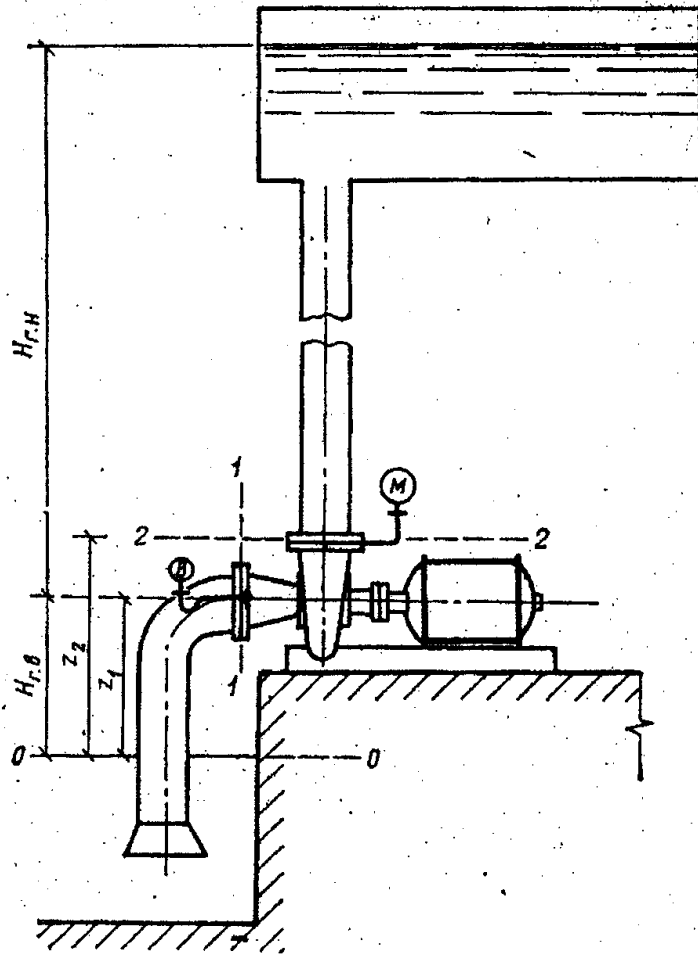


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд насосної установки з горизонтальним насосом: «0 – 0» – поверхня води на відборі; М – манометр; В – вакуумметр.

Напір, який повинен створювати насос визначають за формулою

$$H = H_{зв} + H_{гн} + h_{зв} + h_{гн}, \quad (2.1)$$

де  $H_{зв}$  - геометрична висота всмоктування,

$H_{гн}$  - геометрична висота нагнітання,

$h_{зв}$  - втрати в трубі всмоктування,

$h_{гн}$  - втрати в трубі нагнітання.

Корисна потужність насоса – потужність яка передається переміщуваній рідині

$$N_K = Q \cdot p, \text{ Вт} \quad (2.2)$$

де  $p$  - тиск (напір) в Па,

$Q$  в м<sup>3</sup>/с.

Якщо користуватися прийнятими у практиці одиницями подачі в м<sup>3</sup>/год, напору в м, то формула прийме вигляд

$$N_K = 0,0027 Q \cdot H \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Потужність, яку споживає насос від двигуна, дорівнює

$$N = N_K / \eta_n \quad (2.4)$$

ККД насоса  $\eta_n$  враховує гідравлічні, об'ємні і механічні втрати потужності. Гідравлічні втрати – це втрати на подолання гідравлічного опору при руху рідини від входу до виходу з насоса, об'ємні втрати – це втрати від перетікання частини рідини з області високого тиску в область зниженого тиску та від протікання через сальники, механічні втрати складаються з втрат на тертя. ККД серійних насосів тримається на рівні **0,6...0,92**. ККД насосного агрегату, тобто насоса з'єднаного з двигуном, дорівнює

$$\eta_A = \eta_n \cdot \eta_{дв}, \quad (2.5).$$

Потужність двигуна для насоса завжди більша потужності насоса. Коефіцієнт запасу залежить від потужності насоса. В [1] рекомендують вибирати такі значення  $K_{зан}$

$$\begin{aligned} N \leq 2 \text{ кВт} & \text{ --- } K_{зан} = 1,5 \\ 2 < N < 5 & \text{ --- } 1,5 \dots 1,25 \\ 5 < N < 50 & \text{ --- } 1,25 \dots 1,15 \\ 50 < N < 100 & \text{ --- } 1,15 \dots 1,05 \\ N > 100 & \text{ --- } 1,05 \end{aligned}$$

## 2.3 Характеристика насоса

Характеристикою насоса називають графічне зображення залежності його основних показників (напору, потужності, ККД і допустимої висоти всмоктування) від подачі при незмінних значеннях частоти обертання, густини і в'язкості рідини. Розрізняють теоретичні і експериментальні характеристики насосів. Теоретичні характеристики насоса отримують, користуючись основними рівняннями теорії насосів. Але через те, що на роботу насоса впливає багато різних факторів, вплив яких неможливо врахувати, теоретичні характеристики є неточними і ними практично не користуються. Істинні залежності параметрів насоса визначають експериментально шляхом проведення заводських випробувань на стенді. Отримані в результаті цих випробувань значення параметрів  $Q$ ,  $H$ ,  $N$  і  $\eta$  наносять на графік і отримують криві, зображені на рис. 2.2.

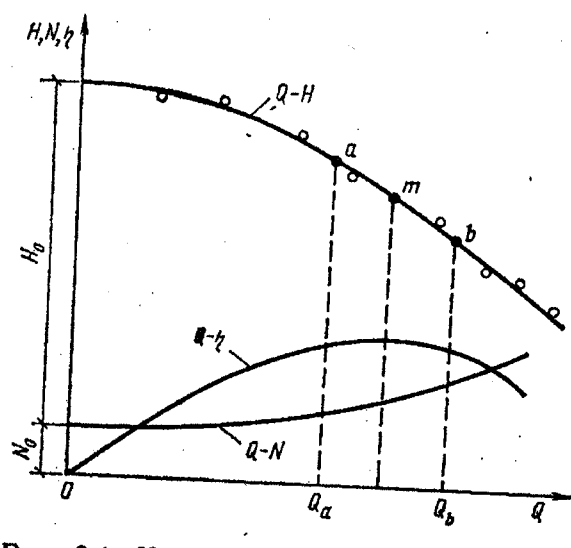


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд характеристики насоса

На характеристиках насоса є кілька характерних точок. Початкова точка на вісі ординат  $H_0$  відповідає роботі насоса при закритій засувці на напорному патрубку ( $Q=0$ ). У цьому режимі насос створює напір  $H_0$  і споживає потужність  $N_0$ . Споживана потужність (30% від номінальної) витрачається на механічні втрати і нагрівання води в насосі. Робота насоса в цьому режимі

можлива лише на короткому проміжку часу (кілька хвилин). Точка оптимального режиму –  $m$  відповідає максимальному значенню ККД. Робоча зона характеристики лежить по обидва боки від неї, між точками  $a$  і  $b$ . Кінцева точка характеристики  $Q-H$  відповідає тому значенню подачі, після якого насос входить в режим кавітації. Цей режим є руйнівним неробочим, тому ми його не розглядаємо. Нормальна робота відцентрового насоса забезпечується в режимі, в якому абсолютний тиск в усіх частинах його внутрішньої порожнини перевищує тиск насиченої пари рідини.

На заводських характеристиках насосів зображують ще одну криву  $Q-\Delta h$  залежності допустимої висоти всмоктування від подачі. Цю криву використовують при проектуванні насосної установки.

Основною кривою, яка потрібна для вибору насоса при проектуванні є залежність  $Q-H$ . Характеристика  $Q-H$  насоса суттєво залежить від діаметра робочого колеса. Заводи поставляють насоси з колесами одного з трьох розмірів: необрізаними, обрізаними і максимально обрізаними. Це дає можливість розширити робочу зону насоса, як показано на рис. 2.3. – необрізаному колесу відповідає верхня крива, обрізаному – крива  $a-a$ , максимально обрізаному  $b-b$ .

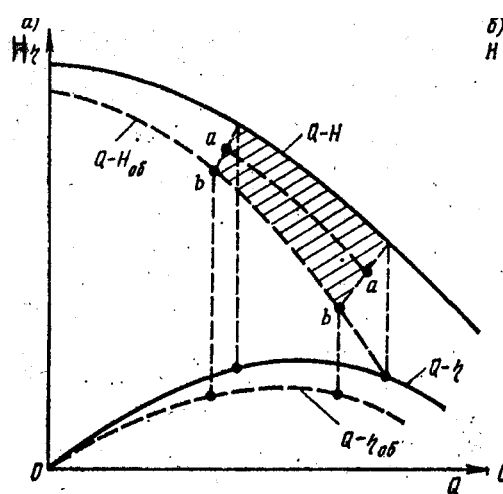


Рисунок 2.3 – Робоча область характеристик відцентрового насоса

Наведені характеристики отримують при максимально допустимій частоті обертання насоса. Для того щоб по характеристиці при частоті обертання  $n$  побудувати характеристики при інших частотах використовують формули закону подібності.

$$H_1 / H = (n_1 / n)^2 \cdot (D_1 / D)^2$$

$$Q_1 / Q = (n_1 / n) \cdot (D_1 / D)^3$$

$$N_1 / N = (n_1 / n)^3 \cdot (D_1 / D)^5$$

Характеристики  $Q - H$  при частотному регулюванні зображені на рис. 2. 6.

## 2.4 Характеристика системи і робочий режим насоса

Насос працює на систему. Найпростішою системою є трубопровід, який з'єднує насос з баком. Як відомо з (2.3), напір, створюваний насосом, складається з геометричної висоти підйому рідини і суми гідравлічних втрат.

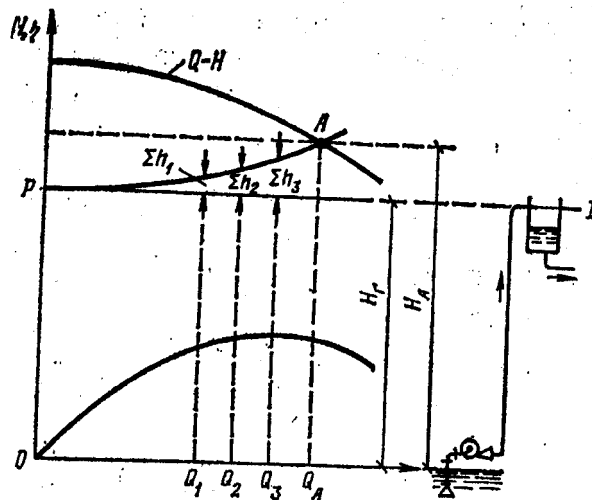


Рисунок 2.4 – Суміщені характеристики насоса і найпростішої системи

Сума гідравлічних втрат  $\sum h_B$  залежить від діаметра трубопроводу і його довжини, шорсткості його внутрішньої поверхні, кількості фланцевих переходів і згинів та витрати перекачуваної рідини. Наближено її можна оцінити за формулою

$$\sum h_B = (A \cdot l + A_M \sum \xi) \cdot Q^2, \quad (2.6)$$

де  $A$  – питомий опір по довжині труб;

$l$  – довжина трубопроводу;

$A_M$  – місцевий питомий опір;

$\sum \xi$  - сума коефіцієнтів місцевих опорів.

Точнішу характеристику системи можна побудувати експериментально на реальній системі. Її будують наступним способом.

На графіку рис. 2.4 проводять пряму  $pD$ , паралельну осі абсцис на відстані від неї  $H_r$ , вибирають кілька значень подачі  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ , обчислюють відповідні їм значення  $\Delta h_g$ , відкладають ці значення вгору від прямої  $PD$  у відповідних точках подачі і з'єднують ці точки плавною кривою. Величину  $H_r$  називають статичною складовою характеристики системи, а величину  $\Delta h_g$  - динамічною. Схема включення насоса на рис. 2. 4 передбачає тільки один режим роботи – в точці  $A$  його характеристики. У практиці таку схему застосовують рідко, бо вона є неекономічною.

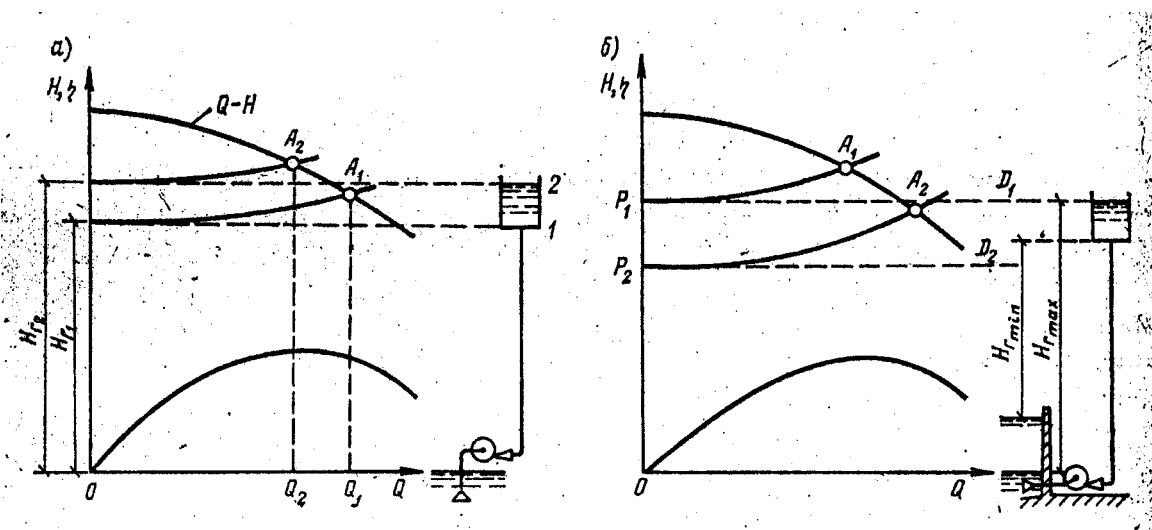


Рисунок 2.5 – Суміщені характеристики насоса і системи

Частіше застосовують включення насоса за схемою рис. 2.5 а). За цією схемою режим роботи насоса при наповненні бака буде змінюватися від т.  $A_1$  до т.  $A_2$ . Різниця в подачі насоса буде суттєвою при великій висоті бака і невеликому геометричному підйомі. Для такої схеми характеристику системи будують за розрахунковими рівнями води в резервуарі.



У розглянутих схемах насос працює при постійному рівні води в джерелі. Якщо насос працює з підпором або при змінному рівні у резервуарі, то суміщену характеристику насоса і системи будують за схемою включення, зображеною на рис. 2.5 б). При цьому приймають самий не вигідний режим – найнижчий рівень води в резервуарі і найвищий в напірному бак. При всіх випадках насос буде працювати з більшою подачею.

## **2.5 Керування насосним агрегатом**

Керування насосним агрегатом полягає у виконанні наступних операцій:

- перевірка заповнення насоса рідиною;
- пуск насоса і виведення на робочий режим;
- регулювання подачі;
- зупинка насоса.

Перед пуском насос потрібно заповнити рідиною. Спосіб заповнення насоса обирається при його установці. Якщо насос розміщений вище горизонту рідини (як у свердловині), то його впускний трубопровід занурений у рідину і камера насоса залишається заповненою і після зупинки насоса. В інших випадках для автоматичної заливки насоса при його установці вище насоса встановлюють бак-акумулятор невеликої ємності, з'єднаний зі всмоктуючим трубопроводом. Але в усіх випадках перед пуском електродвигуна заповнення насоса необхідно перевірити.

Пуск насоса можна здійснити одним з трьох способів:

- при закритій напірній засувці;
- з одночасним відкриттям засувки і пуском електродвигуна;
- при відкритій напірній засувці.

Перший спосіб характеризується малим початковим пусковим моментом (5 – 20% на початку пуску і 35 – 50% при кінці) і плавним зростанням тиску в напірному трубопроводі, що виключає гідравлічний удар в системі.

Другий спосіб – це або перший, або третій, залежно від тривалості пуску насоса і відкриття засувки. Третій спосіб – пуск при відкритій засувці зручний, якщо насос розміщений нижче горизонту води у відбірному резервуарі (свердловині) і наявності зворотного клапана на напірному трубопроводі. Цей спосіб є найкращим для нашого випадку.

Зупинка насоса здійснюють наступним чином. Спочатку повільно закривають засувку, а потім вимикають живлення двигуна. Повільне закриття засувки запобігає гідравлічному удару, а закриття засувки до зупинки насоса запобігає роботі насоса в режимі гідравлічної турбіни, який є аварійним.

## 2.6 Регулювання подачі відцентрових насосів

Застосовують два способи регулювання подачі відцентрових насосів – зміною характеристики системи і зміною частоти обертання робочого колеса. Змінювати характеристику системи можна засувками або кранами на напорній чи всмоктуючій трубі, перепуском частини рідини з напорної труби у всмоктуючу і впуском повітря у всмоктуючий патрубок насоса. Цими способами можна збільшуючи опір системи зменшувати подачу, що явно неекономічно.

Розглянемо регулювання за цим способом за допомогою рис. 2.6.

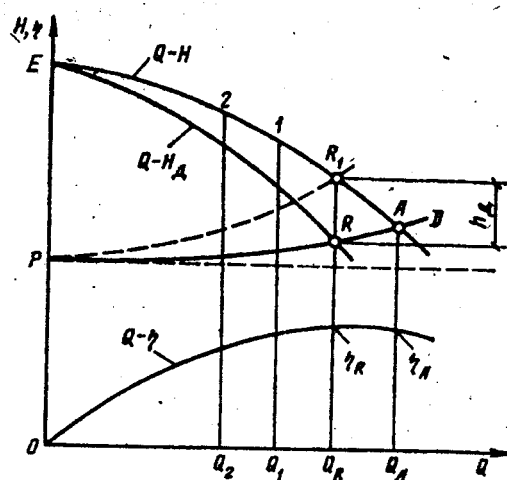


Рисунок 2.6 – Характеристика дросельного регулювання насоса

Крива  $Q-H$  - характеристика насоса; крива  $p-D$  - характеристика системи до дроселювання; крива  $Q-H_D$  - характеристика насоса; крива  $p-R_1$  - характеристика системи після дроселювання.

До регулювання робочий режим насоса характеризувався точкою А на кривій  $Q-H$ . Для зменшення подачі насоса прикривають засувку на його напірному патрубку. Подача зменшилась від  $Q_A$  до  $Q_R$ , а напір збільшився на різницю ординат точок  $R-R_1=h_D$ . Ця різниця напорів є тим лишнім напором, який згашується опором засувки і на згашення якого витрачається додаткова енергія. При прикритій засувці характеристика системи змінюється, характеристика насоса також змінюється, а робочий режим насоса зміщується в область менших значень ККД.

Сучасним енергозберігаючим способом регулювання подачі відцентрових насосів є регулювання частотою обертання робочого колеса насоса. При регулюванні зміною частоти характеристика системи не змінюється. Частоту обертання двигуна підбирають так, щоб робоча точка на характеристиці насоса при потрібній подачі знаходилась в зоні максимального ККД, як на рис.2.7.

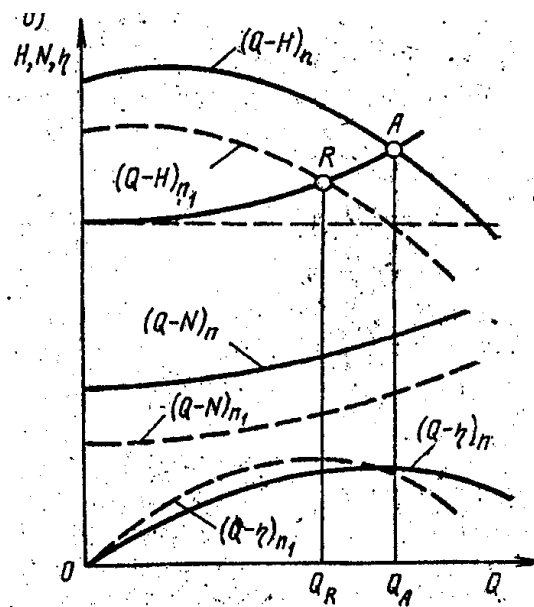


Рисунок 2.7 – Природна і регульовальна характеристики насоса при регулюванні частотою обертання

Аналіз, проведений авторами [2] показує, що при регулюванні подачі відцентрових насосів засувками в діапазоні  $Q_{ном} - 0,5Q_{ном}$  втрати потужності асинхронного електродвигуна досягають 66% номінальної потужності.

# 3 АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ (АДКР) ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ. СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ І МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ АДКР

## 3.1 Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором як об'єкт керування

Керування насосом здійснюється через керування двигуном. Сучасні свердловинні насоси конструктивно виконані так, що мають спільний вал з електродвигуном, як це можна бачити з рис. 3.1. Традиційно для електроприводу насосів використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором – АДКР.

Асинхронні двигуни використовують переважно у нерегульованому електроприводі. АД прості в експлуатації та надійні, бо не мають колекторно-щіткового вузла, у 1,5...2 рази мають меншу питому матеріалоемність. Завдяки цим перевагам асинхронний електропривод є основним видом електроприводу. Недоліком АД є те, що він складний для керування. Але з розвитком напівпровідникової перетворювальної техніки цей недолік вдалося усунути і нині АДКР залишається найперспективнішим електродвигуном як для нерегульованого, так і для регульованого енергозберігаючого електроприводу.

Асинхронні двигуни потужністю від 0,18 *кВт* і більше виготовляють як трифазні. Конструкція, принцип роботи і математичний опис АДКР детально описані в [5]. Розглянемо схему заміщення і механічні характеристики АДКР. Принцип дії трифазного АД заснований на взаємодії обертового магнітного поля статора зі створеним ним же магнітним полем струму ротора.

Процес обертання вектора індукції магнітного поля є синхронізованим з частотою струму статора. Тому частоту обертання поля в АД називають *синхронною частотою* і позначають через  $\omega_0$  *рад/с* або  $n_0$  *об/хв*.

Якщо статор має  $p$  пар полюсів, то

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ об/хв.} \quad (3.1)$$

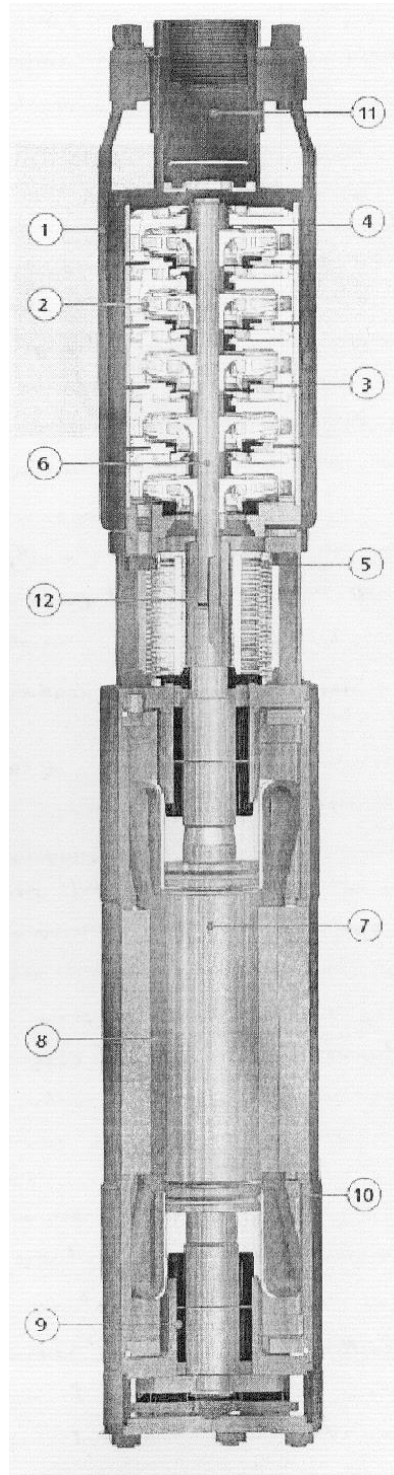


Рисунок 3.1 – Свердловинний насос ЕЦВ з електродвигуном ПЕДВ:  
1 – корпус; 2 і 3 – робоче колесо; 4 – підшипник; 5 – фільтр насоса; 6 – вал насоса і двигуна; 7 – електродвигун; 8 – електродвигун; 9 – упорний підшипник; 11 – зворотний клапан

Обертове магнітне поле, створене струмами статора, пронизуючи обмотку ротора наводить в ній ЕРС, від якої в замкненій обмотці ротора протікає струм. А струм ротора створює магнітне поле ротора, яке взаємодіє з обертовим магнітним полем і створює обертовий момент ротора. Ротор обертається під дією цього моменту, але частота обертання ротора  $\Omega$  (або  $n$ ) менша від частоти обертового поля на деяку величину  $\Delta n$ , яка залежить від параметрів обмоток ротора і статора. Величину

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \Omega}{\omega_0}, \quad (3.2)$$

називають **ковзанням** АД.

Схему заміщення АД зображено на рис. 3.2.

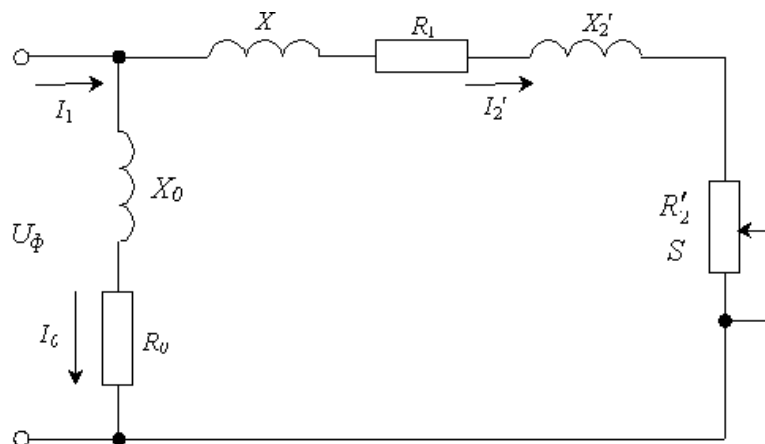


Рисунок 3.2 – Схема заміщення АД (одна фаза):  $U_\phi$  – напруга на фазі обмотки статора,  $I_1$  – фазний струм статора,  $I_2'$  – зведений струм ротора,  $I_0$  – струм холостого ходу (струм намагнічування),  $R_1$ ,  $x_1$  – активний і реактивний опори обмотки статора,  $R_2'$ ,  $x_2'$  – зведені активний та реактивний опори обмотки ротора,  $R_0$ ,  $x_0$  – активний і реактивний опори контурів намагнічування.

Згідно зі схемою заміщення зведений струм ротора

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (3.3)$$

Обертний момент двигуна  $M$  визначаємо з рівняння балансу втрат. Електромагнітна потужність, яка передається від статора ротору,  $P_1 = M\omega_0$ .

Ця потужність складається з двох частин: основної, еквівалентної механічній потужності на валу ротора –  $P = M\Omega$  і потужності втрат на нагрівання, яка дорівнює  $P_1 - P = M\omega_0 - M\Omega = M(\omega_0 - \Omega) = M\omega_0 s$ .

Водночас потужність втрат на нагрівання пропорційна квадрату струму ротора

$$M\omega_0 s = 3(I_2')^2 R_2', \quad (3.4)$$

або

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s}, \quad (3.5)$$

Враховуючи (3.3), отримаємо

$$M = \frac{3U^2 R_2'}{\phi \left[ \omega_0 \cdot s \left[ (R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right] \right]}. \quad (3.6)$$

Це рівняння є рівнянням механічної характеристики АД. Воно розкриває зв'язок між параметрами електричної і механічної енергії і залежність моменту на валу двигуна від напруги і частоти струму при певних конструктивних параметрах обмоток АД. Вже з цього рівняння можна зробити висновок, що при регулюванні частоти обертання АД напругою на обмотках статора двигун втрачає навантажувальну здатність, тобто крутний момент на валу.

Якщо побудувати графік функції  $M = f(s)$ , змінюючи  $s$  у межах від  $-1$  до  $0$  і від  $0$  до  $1$ , то отримаємо криву, зображену на рис. 3.5. Крива має два екстремуми, в яких  $M = M_{max}$ , один у режимі двигуна, другий – у режимі генератора. Прирівнявши  $dM/ds = 0$ , можна знайти критичну точку на характеристиці, в якій  $s = s_k$ ,  $M = M_{max} = M_k$ , а також знайти аналітичне вираження  $s_k$  і  $M_k$

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (3.7)$$



$$M_K = \frac{3U^2 \phi}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2)^2}]}, \quad (3.8)$$

де “+” – у двигунному режимі,

“–” – у генераторному режимі.

Якщо (3.6) поділити на (3.8), то отримаємо

$$M = \frac{2M_K (1 + a \cdot s_K)}{s/s_K + \frac{s_K}{s} + 2as_K}, \quad (3.9)$$

де  $a = R_1/R'_2$ .

Як показує (3.6), момент двигуна пропорційний квадрату напруги, тому АД дуже чутливий до коливань напруги мережі. На практиці наближену механічну характеристику будують по характерних точках, у яких

1.  $s = 0, \quad M = 0;$
2.  $s = s_n, \quad M = M_n;$
3.  $s = s_K, \quad M = M_K;$
4.  $s = 1, \quad M = M_n.$

$$M_{II} = \frac{2M_K (1 + as_K) s_K}{1 + s_K^2 (1 + 2a)}, \quad (3.10)$$

Момент  $M_{II}$  називають початковим пусковим моментом. При  $s > 1$  двигун переходить у режим противмикання, при  $s < 0$  – у режим рекуперативного гальмування, при якому працюючи генератором віддає енергію у мережу живлення. Якщо в (3.9) знехтувати активним опором обмотки статора ( $R_1 \approx 0$ ), що має місце у двигунах великої потужності, то отримаємо наближену формулу

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (3.11)$$

Ця формула носить назву *формули Клоса*. З цієї формули отримаємо

$$s_K = s_H \left( \lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right), \quad (3.12)$$

де  $\lambda = M_K / M_H$  – кратність максимального моменту.

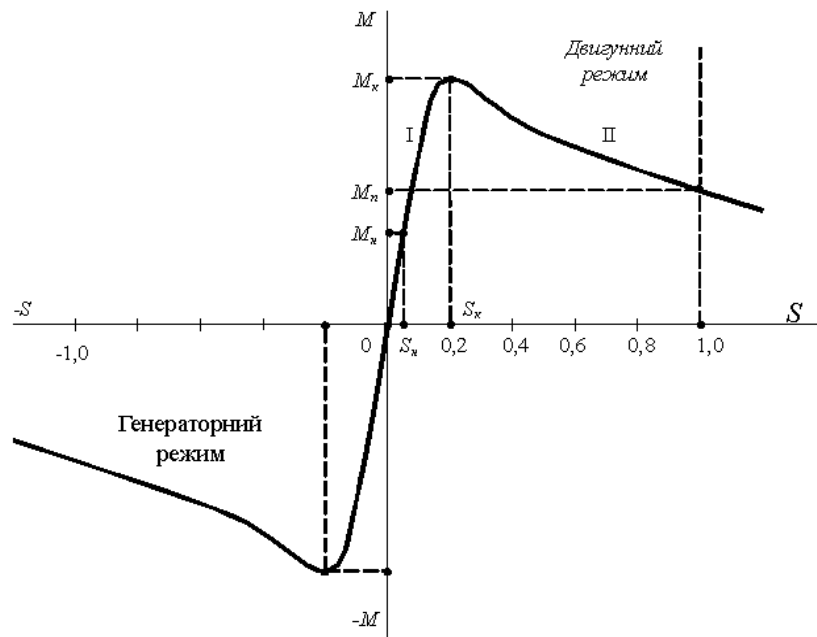


Рисунок 3.3 – Механічна характеристика АД

Аналіз механічної характеристики свідчить, що вона складається з двох зон – робочої *I* і неробочої – *II*. В робочій зоні ковзання змінюється у межах  $0 < s < s_k$ , проходячи через  $s = s_n$ . У цій зоні є практично лінійна ділянка, яка і є робочою ділянкою характеристики. На цій ділянці рівняння характеристики має вигляд

$$M \approx (2M_k / s_k) \cdot s, \quad (3.13)$$

або

$$M \approx Bs,$$

де  $B = 2M_k / s_k$ .

Отже, при роботі у цій зоні частота обертання лінійно залежить від моменту двигуна. В цій зоні характеристики знаходяться точки, що відповідають номінальним даним двигуна –  $M_n$ ,  $I_{1n}$ ,  $n_n$ ,  $s_n$ . Значення номінального ковзання залежать від опору обмотки ротора. Меншим значенням опору відповідають менші ковзання. У двигунах малої потужності (до 10 кВт)  $s_n$  знаходиться у межах 5 – 7 %, при потужності 20 – 200 кВт  $s_n$  має значення від 5 % до 2%.

### 3.2 Регулювання частоти обертання АДКР

З початку застосування (1891 р.) і майже до кінця ХХ ст. асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором застосовували в нерегульованому електроприводі вентиляторів, насосів, компресорів та інших виробничих механізмів. Продуктивність цих механізмів регулювали не електричним, а механічним способом – засувками, шиберами, кранами. З розвитком технології напівпровідникових електронних елементів і появою силових діодів, транзисторів і тиристорів з'явилися енергоекономічні регульовані джерела живлення двигунів – тиристорні випрямлячі і інвертори. Сучасні способи регулювання частоти обертання АД розглянуто в [ 5 ]. Найбільш поширеним з них і таким, що найбільше впроваджується у практику є метод керування вектором магнітного потоку статора АД. Цей метод полягає в наступному. При режимі роботи на лінійній ділянці кривої намагнічування напруга, частота і магнітний потік статора пов'язані між собою співвідношенням

$$U_{\phi} \approx E_{\phi} = 4,44N_1\Phi_m \cdot f .$$

Ця формула, записана у відносних величинах, має вигляд

$$\Phi_* = \frac{U_{\phi*}}{f_*} , \quad (3.14)$$

де  $\Phi_* = \Phi / \Phi_H$ ;  $\dots U_{\phi*} = U_{\phi} / U_{\phi H}$ ;  $\dots f_* = f / f_H$ .

З останнього випливає, що за наявності ТПЧ напругу і частоту струму живлення можна регулювати так, щоб підтримувати незмінним магнітний потік відношенням  $\frac{U}{f}$ .

Магнітний потік і крутний момент двигуна пов'язані між собою співвідношенням

$$M_* = \Phi_* I_{2*}' \cdot \sin\varphi_2 , \quad (3.15)$$

де  $\varphi_2$  – кут між струмом і потоком, який при малих ковзаннях близький до  $\pi/2$ .

У [2 ] показано, що  $I_{2*} = I_{1*} \cdot \cos \varphi_1$  , тобто струм ротора можна визначити вимірюванням струму статора. Там же показано, що оптимальне значення потоку, при якому втрати у двигуні мінімальні при заданих значеннях  $M_*$  і  $\omega_*$

$$\Phi_{opt*} = I_{2*} \cdot \sqrt{\frac{k_{v*}}{k_{v*} + k_{cm*} \cdot \omega_*^\beta}} , \quad (3.16)$$

де  $k_{v*}, k_{cm*}$  – коефіцієнт змінних втрат і коефіцієнт втрат у сталі двигуна.

Функціональна схема пристрою для реалізації поданого алгоритму наведена на рис. 3.4. Система складається з об'єкта регулювання – АД, тиристорного перетворювача частоти ПЧ, давачів напруги ДН і струму статора ДТ, регулятора напруги РН і обчислювального пристрою ВУ. Вона працює наступним чином. Сигнали струму і напруги статора подаються на входи обчислювального пристрою ВУ. Він за виміряними значеннями напруги  $\dot{U}_\phi$  та струму  $I_1$  обчислює струм  $I_2$  і значення  $\Phi_{opt}$ . Потім ВУ обчислює значення напруги  $\dot{U}_{\phi opt}$ , яке потрібне для створення цього потоку. Сигнали керування для створення потрібної напруги і частоти подаються на входи тиристорного перетворювача ПЧ. Перетворювачі, які використовують для частотного керування асинхронними двигунами, побудовані за різними схемами.

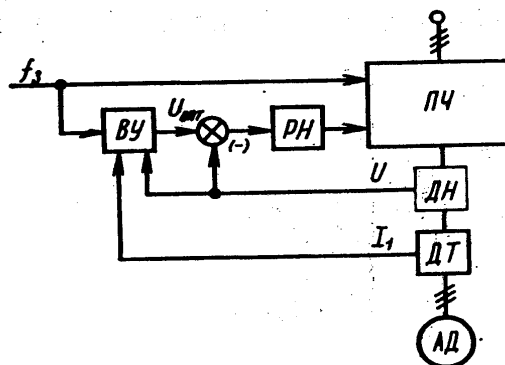
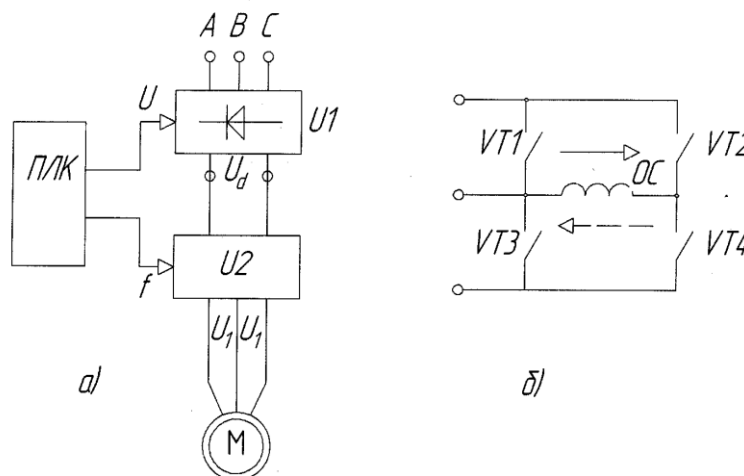


Рисунок 3.4 – Схема функціональна автоматичної системи регулювання вектора потоку статора АД.

Найбільш розповсюдженим є перетворювач з керованим випрямлячем та інвертором. Його функціональна схема зображена на рис. 3.5.



### *Тиристорний перетворювач частоти*

*а)-схема функціональна; б)-схема комутації вентилів у перетворювачі U2*

Рисунок 3.5 – Схема функціональна електроприводу АД-ТПЧ-ПЛК

У керованому випрямлячі U1 напруга змінного струму випрямляється у напругу постійного струму  $U_d$ , значення якої можна змінювати зовнішнім сигналом керування тиристорами. В інверторі напруга постійного струму перетворюється в напругу змінного струму  $U_1$  потрібної частоти, яку також можна змінювати сигналом керування. Сигнали керування тиристорами формуються програмою імпульсно-фазового керування (СІФК), яка у даному випадку введена у програмований контролер ПЛК. Напруга, що подається на АД, регулюється у випрямлячі, а частота – в інверторі. Принципова електрична схема силового блоку електроприводу АД-ТПЧ-ПЛК зображена на рис. 3.7.

### **3.3 Апаратурна реалізація частотного методу регулювання АД**

Метод регулювання частоти вектором потоку статора технічно реалізовано різними фірмами, у тому числі – “MITSUBISHI ELECTRIC” (перетворювачі типів FR-S-500, FR-E-520, FR-E-540, FR-A-540 на діапазон

потужностей від 0,2 до 55 кВт), “SCNEIDER ELECTRIC” (серійно виготовляє перетворювачі типу “ALTIVAR 58” та “ALTIVAR 68” - [11].

Функціональна схема регульованого електроприводу з перетворювачем типу “ALTIVAR 58” зображена на рис. 3.6.

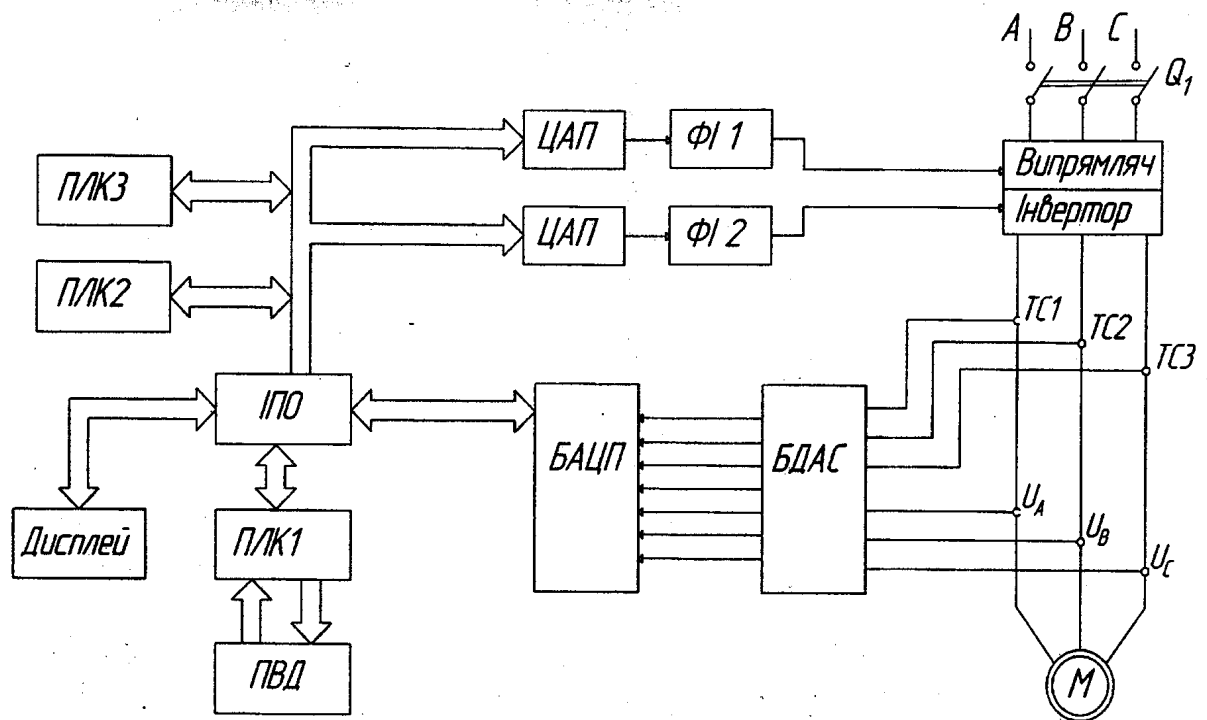


Рисунок 3.6 – Схема функціональна електроприводу АД-ТПЧ-ПЛК з векторним керуванням: **БДАС** – блок давачів аналогових сигналів; **БАЦП** – блок аналого-цифрових перетворювачів; **ІПО** – інтерфейс паралельного обміну; **ПЛК1** – програмований логічний контролер керування; **ПВД** – пульт вводу даних; **ПЛК2** – програмований логічний контролер системи ідентифікації вектора потокозчеплення; **ПЛК3** – програмований логічний контролер системи імпульсно-фазового керування випрямляча і інвертора; **ЦАП** – цифро-аналоговий перетворювач; **ФІ 1, ФІ 2** – блоки формувачів імпульсів керування тиристорами; **ТС1, ТС2, ТС3** – трансформатори струму; **U<sub>A</sub>, U<sub>B</sub>, U<sub>C</sub>** – давачі напруги

Силовий блок електроприводу складається з випрямляча і інвертора, його схема зображена на рис.3.7.

Випрямляч виконано за мостовою схемою, інвертор – за схемою автономного інвертора напруги (АІН). Трансформатори струму ТС1,ТС2, ТС3 і давачі напруги  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  встановлені для вимірювання сигналів струмів і напруг, з яких формуються сигнали керування тиристорами випрямляча й інвертора. Програмований логічний контролер ПЛК1 призначений для загального керування системою, для програмування і зберігання даних і програм. Програмований логічний контролер ПЛК2 призначений для обробки результатів поточних вимірювань струмів статора, напруги і частоти і для обчислення значення оптимального потокозчеплення та відповідних йому значень напруги і частоти та сигналів керування на ПЛК3, у якому формуються кодовані сигнали керування тиристорами випрямляча й інвертора. Сформовані ПЛК3 кодовані сигнали за допомогою цифро-аналогових перетворювачів перетворюються у відповідні значення напруги, з якої формувачі імпульсів  $\Phi_{I1}$  і  $\Phi_{I2}$  формують імпульси відповідної форми й потужності, які подаються на керуючі електроди тиристорів. Регулювання здійснюється за законом (3.14) при номінальному ковзанні на всіх частотах.

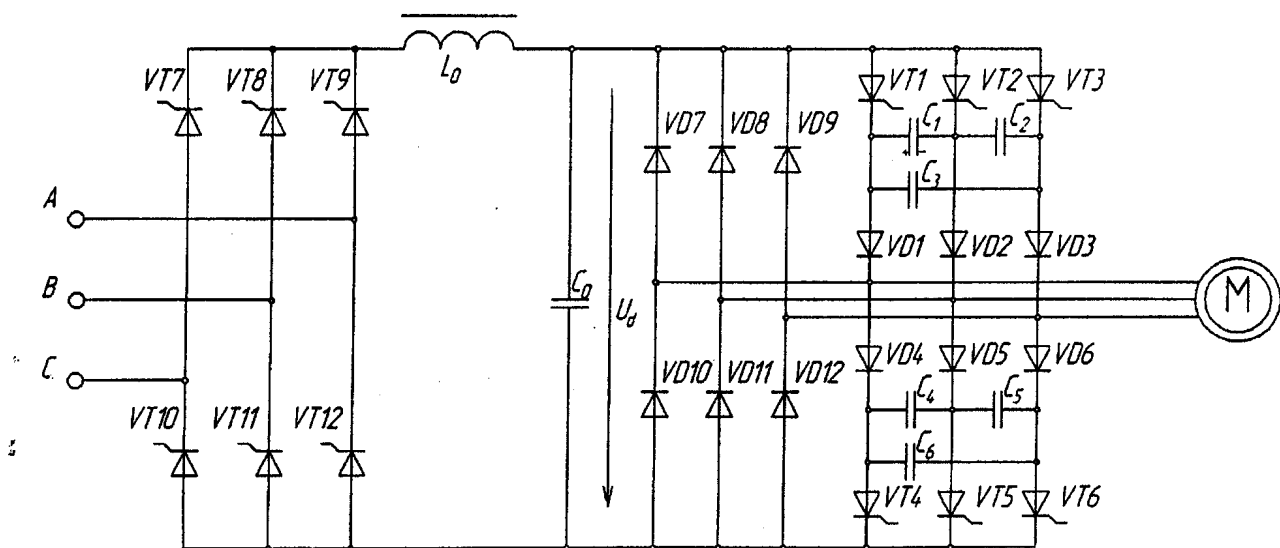


Рисунок 3.7 – Схема електрична принципова силового блоку ТПЧ

Сучасні схеми силового блоку в модифікаціях “ALTIVAR 31”, “ALTIVAR 71” відрізняються від схем “ALTIVAR 58” тим, що випрямляч у схемі перетворювача виконують на діодах, некерованим, а замість автономного інвертора АІН застосовують ШІМ- модулятор на IGBT транзисторах.

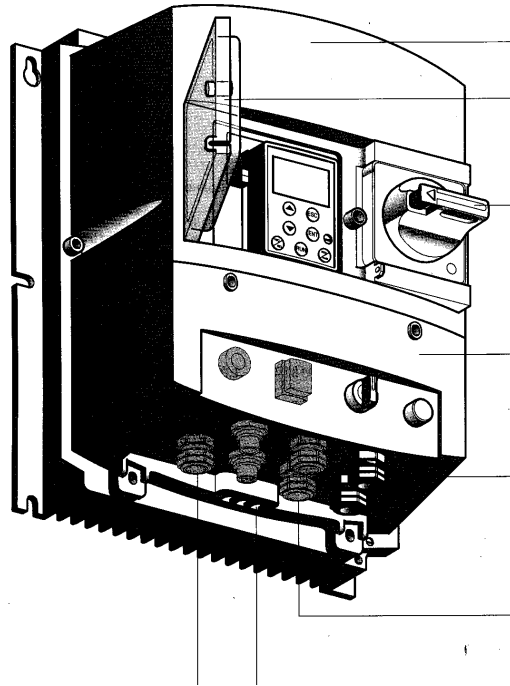


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд конструктивного оформлення ТПЧ-ПЛК типу “ALTIVAR 58”

Подібна схема зображена на рис. 4.4. Крім того, в сучасних комплектних електроприводах крім трьох ПЛК застосовують один двоядерний контроллер.



## II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 4 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ . ВИБІР ТИПОРОЗМІРУ НАСОСА. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗАВОДСЬКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСА. ПОБУДОВА ЧАСТОТНОЇ РЕГУЛЮВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСА. ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ

#### 4.1 Технологічна схема свердловинної системи водопостачання

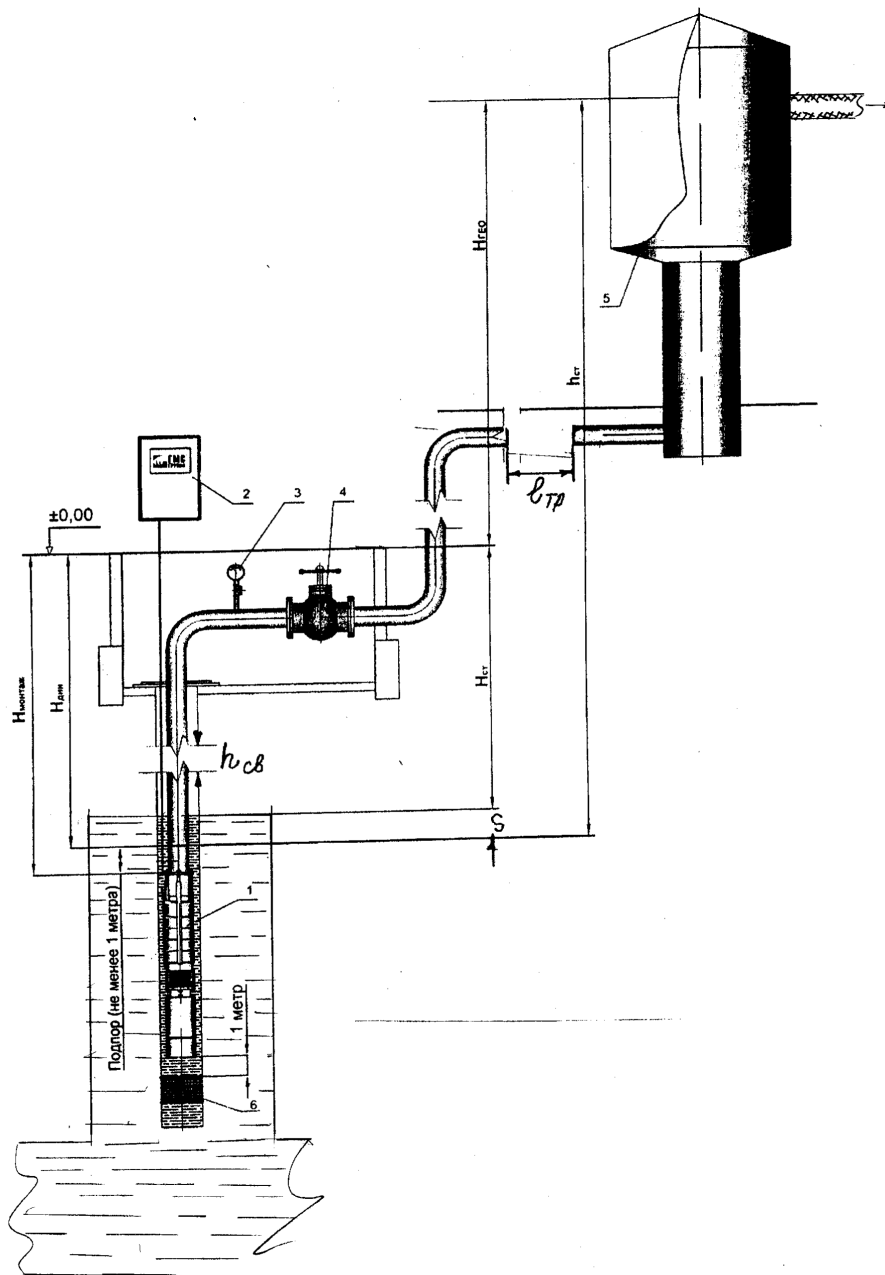


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд свердловинної системи водопостачання:  
1 – свердловинний насос з електродвигуном; 2 – станція керування і захисту;  
3 – манометр; 4 – засувка; 5 – бак; 6 – фільтр

## 4.2 Вибір типу та розміру насоса за вихідними даними варіанту

Номер варіанту студент обирає з таблиці 4.1. за номером прізвища у списку в журналі. За даними варіанта з таблиці 4.1 студент визначає значення подачі і напору в системі і обирає типорозмір насоса. Значення подачі студент обчислює за формулою

$$Q_i \approx 0,50 \dots 75 Q_{i \max}, \quad (4.1)$$

де  $Q_{i \max}$  - верхня межа дебіту свердловини  $i$  - го варіанту.

Значення напору  $H$  студент обчислює за формулою

$$h_{ст} = H_{дин} + H_{гео} + \Delta h, \quad (4.2)$$

де  $H_{дин} = h_{св} + S$ ;

$h_{св}$  - глибина свердловини від нульової відмітки до рівня води в насосі;

$S$  – передбачуване зниження рівня свердловини за графіком питомого дебіту (для всіх варіантів обираємо  $S = 5 м$ );

$\Delta h$  - втрати напору в трубопроводі, засувках і кранах.

Значення втрати напору  $\Delta h$  студент визначає за заданою довжиною труби  $l_{тр}$  і глибиною за допомогою таблиці 4 з додатку А.

Спочатку студент обирає діаметр трубопроводу, по якому вода подається з свердловини в бак. Діаметр труби обирають таким, щоб при даній подачі швидкість потоку була у межах  $1,5 \dots 3,0 м/с$ . Потім для вибраного діаметра в таблиці знаходять значення втрати напору на  $100 м$  труби і обчислюють значення втрат для свого варіанту. Для врахування втрат у засувках, колінах труби та фланцевих з'єднаннях отримане значення множимо на  $1,02 \dots 1,05$ .

Отже, довжина трубопроводу, на якій рахуємо втрати, дорівнює

$$L_{тр} = h_{св} + l_{тр} \quad (4.3)$$

Далі з каталогу [4] вибираємо серію насосів, ККД яких при даній подачі буде максимальним. На напірній характеристиці знаходимо робочу точку і найближчу до неї криву відповідного насоса.

Таблиця 4.1 – Варіанти вихідних даних

Варіант №	Свердловина			Башта-резервуар		Насос	
	Дебіт, $m^3/год$	Трубо-провід $l_{Tp}, m$	Глибина $h_{св}, m$	Висота $H_{ГЕО}, m$	Об'єм бака, $m^3$	Типорозмір-подача-напір	Потужність, $kWt$
1	3...5	150	40	20	50	ЕЦВ 4-2.5-Х	
2	5...8	50	45	15	100	ЕЦВ 4-6,5-Х	
3	8...12	140	40	18	250	ЕЦВ 4-10-Х	
4	12...20	150	50	20	300	ЕЦВ 4-16-Х	
5	20...30	160	30	15	600	ЕЦВ 6-25-Х	
6	30...50	170	30	20	1200	ЕЦВ 8-40-Х	
7	50...80	80	40	25	1500	ЕЦВ 8-65-Х	
8	80...125	90	50	25	2400	ЕЦВ 8-65-Х	
9	125...150	100	60	25	2400	ЕЦВ10-120-Х	
10	150...200	120	80	15	3600	ЕЦВ10-160-Х	
11	3...5	100	25	35	50	ЕЦВ 4-2.5-Х	
12	5...8	90	35	20	100	ЕЦВ 4-6,5-Х	
13	8...12	80	45	25	250	ЕЦВ 4-10-Х	
14	12...20	70	55	15	300	ЕЦВ 4-16-Х	
15	20...30	60	65	15	600	ЕЦВ 6-25-Х	
16	30...50	150	75	15	1200	ЕЦВ 8-40-Х	
17	50...80	140	65	15	1500	ЕЦВ 8-65-Х	
18	80...125	145	55	15	2400	ЕЦВ 8-65-Х	
19	125...150	150	45	15	2400	ЕЦВ10-120-Х	
20	150...200	160	60	15	3600	ЕЦВ10-160-Х	
21	3...5	150	45	15	50	ЕЦВ 4-2,2 -Х	
22	5...8	160	25	35	100	ЕЦВ 4-6,5-Х	
23	8...12	170	15	25	250	ЕЦВ 4-10-Х	
24	12...20	175	25	25	300	ЕЦВ 4-16-Х	
25	20...30	180	35	20	600	ЕЦВ 6-25-Х	
26	30...50	85	45	25	1200	ЕЦВ 8-40-Х	
27	50...80	90	55	35	1500	ЕЦВ 8-65-Х	
28	80...125	95	65	15	2400	ЕЦВ 8-65-Х	
29	125...150	100	20	40	2400	ЕЦВ10-120-Х	
30	150...200	120	30	40	3600	ЕЦВ10-160-Х	

За вибраним типорозміром насоса обирається типорозмір електродвигуна. Під вибраний двигун студент з каталогів обирає серійний перетворювач частоти, виконує необхідні розрахунки системи живлення та захисту електродвигуна, розробляє схему живлення та захисту, складає алгоритми та програми контролю та керування роботою насоса.

**ПРИКЛАД.** Далі все будемо показувати на прикладі варіанту 31.

Варіант №	Свердловина			Башта-резервуар		Насос	
	Дебіт, $m^3/год$	Трубо-провід $l_{Tr}, m$	Глибина $h_{св}, m$	Висота $H_{ГЕО}, m$	Об'єм бака, $m^3$	Типорозмір-подача-напір	Потужність, $kWt$
<b>31</b>	<b>30...50</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>15</b>	<b>1000</b>	<b>ЕЦВ 8-40-90</b>	

За виразом (4.1) знаходимо задовільне значення подачі

$$Q_{31} = 0,75 \cdot 50 = 37,5 m^3/год.$$

Найближчим до цього в каталозі [4] типорозмір насосів ЕЦВ 8-40.

За формулою (4.2) знаходимо значення напору. Загальна довжина трубопроводу від виходу з насосу до входу в резервуар за формулою (4.3) дорівнює 100 м, трубопровід сталевий.

З таблиці №4 каталогу при подачі  $40 m^3/год$  задовільну для охолодження двигуна швидкість потоку  $2,97 m/c$  забезпечує труба з умовним прохідним діаметром  $D_y, 65$ . У цій трубі втрати напору складають  $19,89 m \approx 20m$  на  $100 m$  довжини. Отже,

$$X = h_{cm} = H_{дин} + H_{ГЕО} + \Delta h = 40 + 5 + 15 + 20 = 80m.$$

З каталогу [4] вибираємо насос **ЕЦВ 8-40-90**. В каталозі знаходимо характеристики цього насосу, визначаємо на кожній характеристиці робочу точку і зону робочого режиму  $Q_{min}...Q_{max}$ , переносимо дані в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри робочого режиму насоса ЕЦВ 8-40-90

Подача $Q, \text{м}^3/\text{год}$	$Q_{\min} = 28$	$Q_{\text{ном}} = 40$	$Q_{\max} = 48$
Напір $H, \text{м}$	100	90	75
Споживана потужність $P_2$ кВт (графічна)	11,6	13,3	14,0
ККД, $\eta$	0,65	0,72	0,70
Розрахункова Потужність $P_{2p}$	11,6	13,5	13,9

### 4.3 Аналіз характеристик насоса

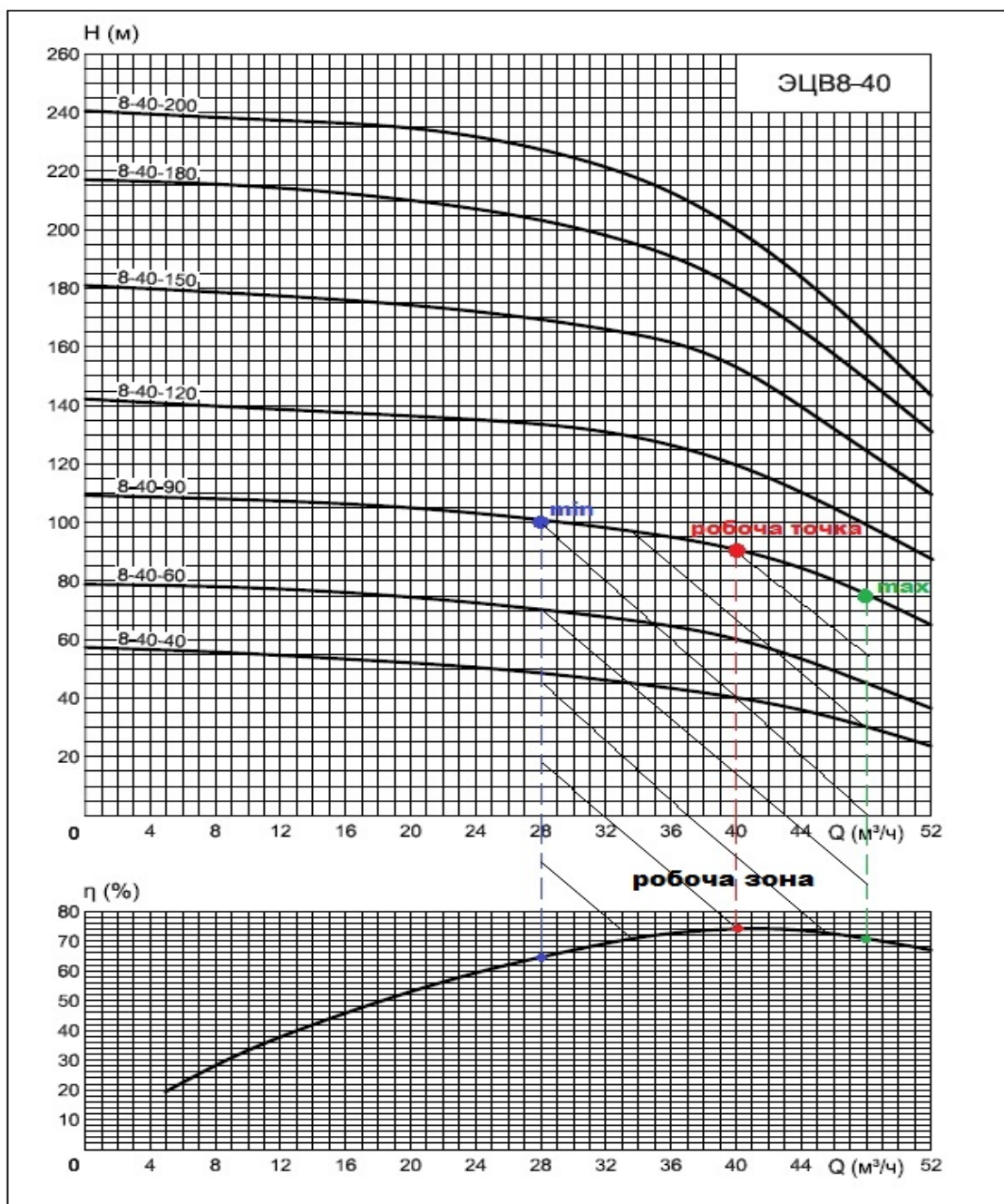


Рисунок 4.2 – Характеристики  $H-Q$  і  $\eta(Q)$  насоса ЕЦВ 8-40-90

Для складання схеми живлення насосного агрегату, розрахунку і вибору елементів комутації, захисту, контролю та керування, побудови механічної та регулювальних характеристик необхідно обчислити основні технічні параметри установки.

1. Механічну потужність насоса в номінальному режимі визначимо за формулою (2.5)

$$N = 0,0027 \cdot 40 \cdot 90 = 9,72 \text{ кВт}.$$

2. Споживану потужність насоса визначимо за формулою (2.6)

$$P_{2p} = N / \eta = 9,72 / 0,72 = 13,5 \text{ кВт}$$

3. Знайдемо розрахункові значення  $P_{2p}$  на краях робочого діапазону.

Запишемо отримані дані в таблицю 4.2. Розрахункові дані і дані заводських характеристик добре співпадають.

$$P_{2p \min} = 0,0027 \cdot 28 \cdot 100 / 0,65 = 11,6 \text{ кВт}$$

$$P_{2p \max} = 0,0027 \cdot 48 \cdot 75 / 0,7 = 13,9 \text{ кВт}$$

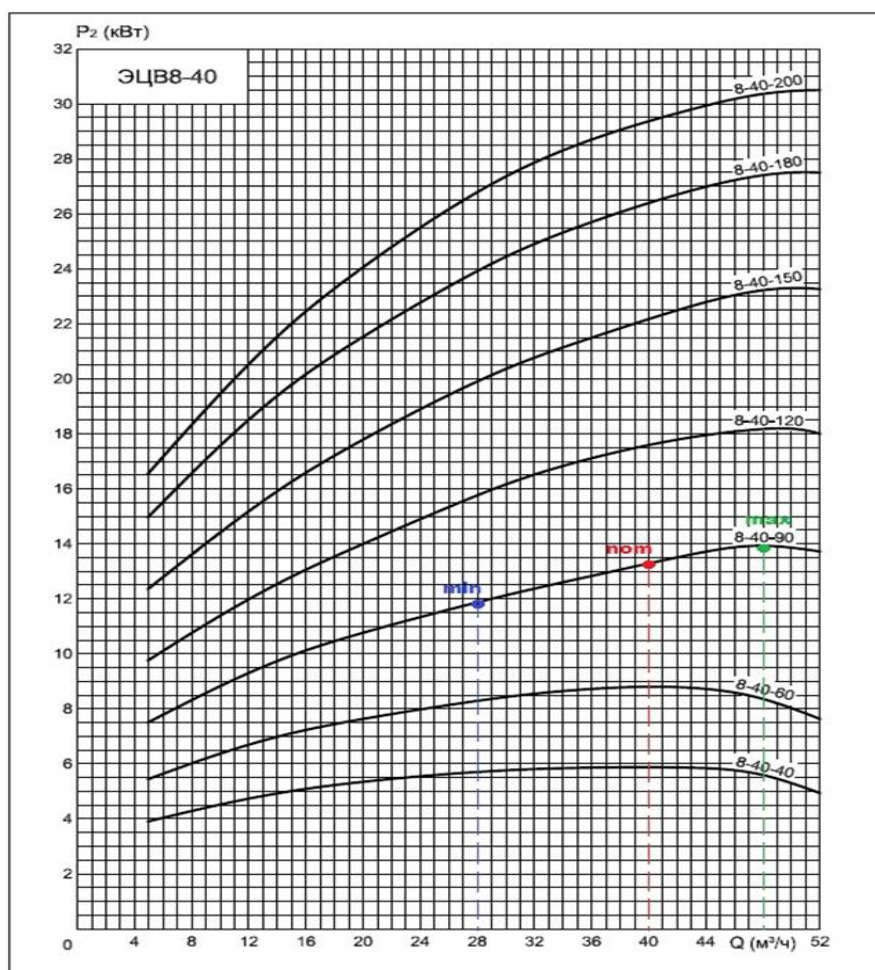


Рисунок 4.3 – Характеристика  $P_2(Q)$  насоса ЕЦВ 8-40-90

#### 4.4 Побудова регулювальних характеристик насоса і розрахунок втрат потужності при дросельному і частотному регулюванні

**ПРИКЛАД.** Побудуємо характеристику системи. Для того на напірній характеристиці насоса 1 (рис.4.5 відмітимо дві точки – точку статичної складової напору на ординаті  $Q = 0; H = H_{г\text{ео}} + h_{\text{св}} = 30 + 15 = 45\text{ м}$  і точку робочого режиму з координатами  $Q = 40\text{ м}^3 / \text{год}; H = 90\text{ м}$ . Проміжні точки визначимо за формулою  $\Delta H_i = \kappa \cdot Q_i^2; \Delta H = 90 - 45 = 45;$ . За цією формулою  $\kappa = \Delta H / Q_n^2$ . У точці номінального режиму  $\kappa = 45 / 1600 = 0,028$ . Знайдемо значення  $H_i$  в інших точках.

$Q_i, \text{ м}^3/\text{год}$	0	8	16	24	32	40	48
$H_i = 15 + \Delta H_i, \text{ м}$	45	47	52	61	74	90	110

Наносимо точки на координатну сітку і отримуємо криву 2.

Далі побудуємо напірну характеристику при частоті обертання насоса 2280 об/хв. Для того скористуємось законом пропорційності

$$Q \cdot H / Q_1 \cdot H_1 = (n / n_1)^3$$

За цим законом

$$\frac{Q_i \cdot H_{n_1}}{Q_i \cdot H_{n_2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

де  $Q_i$  - значення подачі по шкалі подач;

$H_{in_1}$  - відповідне значення напору при частоті  $n_1$ ;

$H_{in_2}$  - відповідне значення напору при частоті  $n_2$ ;

В нашому прикладі

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = \left(\frac{2850}{2280}\right)^3 = (1,25)^3 = 1,95$$

Обчислюємо значення напору при частоті 2280 об/хв для кожного значення подачі і дані заносимо в таблицю, а точки відмічаємо на рис. 4.5. Отримуємо криву 3.

$Q_i,$ $M^3/ГОД$	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
$H_{in_2}$	56,4	56	55,4	55	54	53,8	52,3	51,3	50,2	48,7	46	43,5	38,5

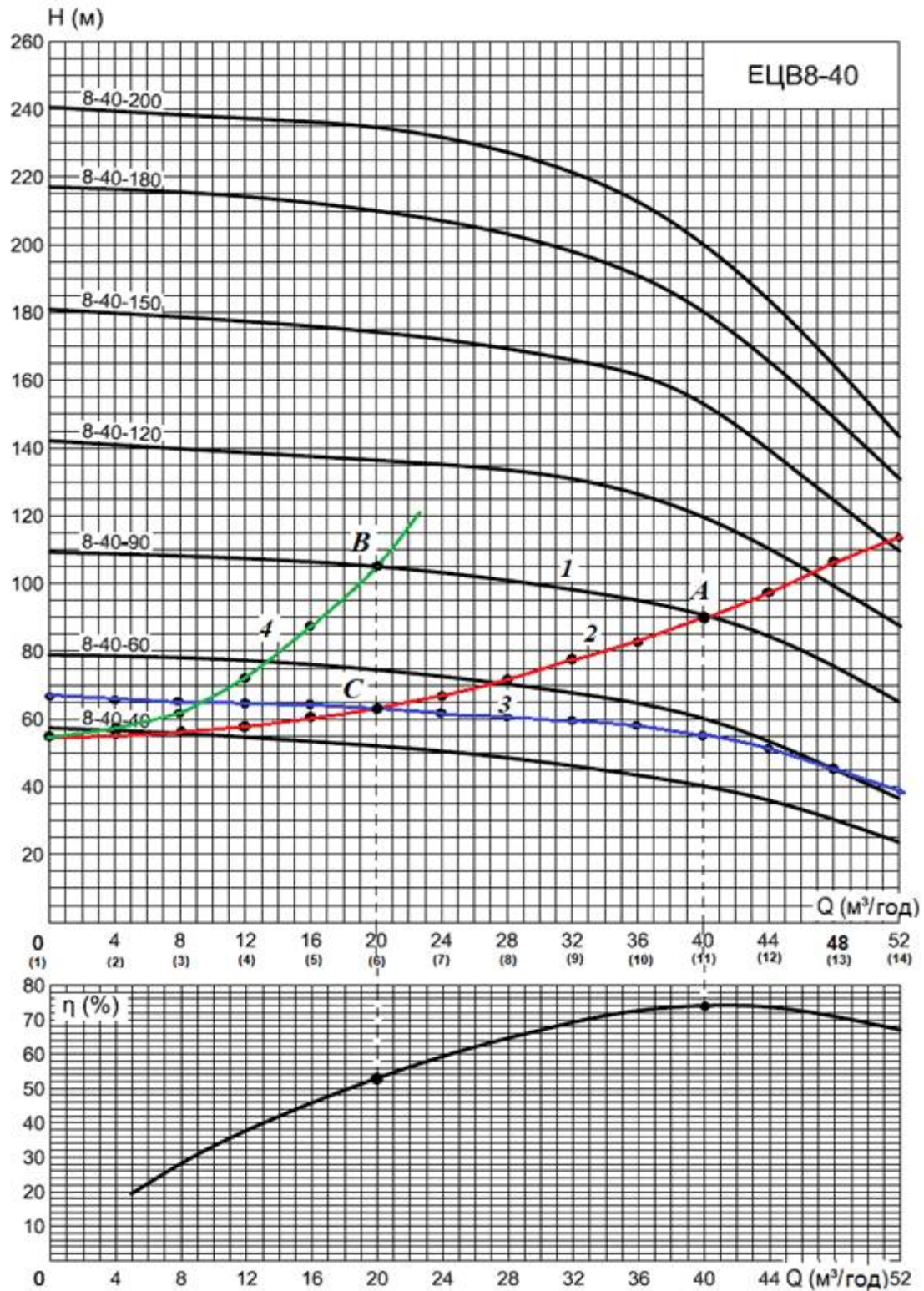


Рисунок 4.5 – Характеристики насоса ЕЦВ8 40-90: **1** – напірна характеристика при номінальному режимі; **2** – характеристика системи; **3** – характеристика при частоті обертання 2280 об/хв; **4** – дросельна характеристика



Далі потрібно побудувати дросельну характеристику системи, тобто характеристику при положенні засувки на нижній межі подачі ( $17 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Її будуємо тим же способом, як і характеристику системи. В результаті отримуємо криву 4.

**Зауваження до рекомендацій виробника насосів ЕЦВ по застосуванню перетворювачів частоти для регулювання подачі:**

- для забезпечення достатнього охолодження двигуна насос повинен працювати в робочому діапазоні подач, його подача не повинна знижуватися більше, ніж на 20% від номінальної;
- подача пропорційна частоті обертання, значить і частоту не можна знижувати більше ніж на 20% від номінальної;
- номінальне значення частоти 2850 об/хв, 20 % від 2850 дорівнює 570.
- при такому співвідношенні нижня межа діапазону частотного регулювання
- $n_{\min} = 2850 - 570 = 2280 \text{ об/хв}$ ;
- в тих же рекомендаціях виробник насосів пише, що для нормальної роботи радіальних і опорного підшипників частота обертання вала двигуна не повинна бути нижчою 2700 об/хв, що обмежує діапазон регулювання до 5%.
- в реальних системах водопостачання діапазон регулювання подачі може бути до 45 % (див. рис. 1.1);
- крім того, виробник насосів попереджає, що застосування ЧРП в системах з переважаючою статичною складовою характеристики системи призводить до спаду ККД насоса.

Отже, якщо керуватися рекомендаціями виробника, то застосування ЧРП у свердловинних системах доцільне тільки у межах 5 % в системах з переважаючою динамічною складовою характеристики. Але при такому вузькому діапазоні регулювання економічний ефект від застосування частотного перетворювача буде незначним.

Враховуючі викладені зауваження, в курсовому проекті приймаємо діапазон регулювання частоти 20%, тобто частоту регулюємо в діапазоні  $(n_{ном} - 0,2n_{ном})$ , обчислюємо втрати потужності при частотному і дросельному регулюванні, визначаємо економоефект і приймаємо рішення щодо застосування ЧРП – доцільно чи не доцільно застосування ЧРП.

### Аналіз регулювальних характеристик:

1. Регулювальна частотна характеристика пересікає характеристику системи при повністю відкритій засувці в точці С. Цій точці відповідає мінімальна подача  $17 \text{ м}^3/\text{год}$  або 42,5% від номінальної  $40 \text{ м}^3/\text{год}$ . Діапазон регулювання подачі задовільняє вимогам системи водопостачання.

2. При регулюванні засувкою в тому ж діапазоні подачі робочою точкою режиму насоса буде точка В, у якій значення напору більше на 50 м.

### Розрахунок економії енергії (на прикладі варіанту 31)

Робочій режим насоса при подачі  $17 \text{ м}^3/\text{год}$  при регулюванні засувкою характеризується точкою В на кривій 1, а при регулюванні частотою обертів двигуна – точкою С. Обчислимо витрати енергії при роботі насоса в точці В і в точці С і порівняємо їх.

Витрати енергії в точці В

$$W_B = P_B \cdot \Delta t_B = (Q_B \cdot H_B / \eta_{HB} \cdot \eta_D) \cdot \Delta t_B,$$

де  $P_B$  - споживана потужність;

$\Delta t_B$  - тривалість часу роботи в цьому режимі (4 год, рис. 1.1);

$Q_B, H_B$  - значення подачі і напору в точці В;

$\eta_{HB}, \eta_D$  - значення ККД насоса і двигуна відповідно.

$$W_B = (105 \cdot 17 \cdot 0,0027 / 0,46 \cdot 0,82) \cdot 4 = 12,8 \cdot 4 = 51,2 \text{ кВт} \cdot \text{год за 1 добу}$$

Витрати енергії в точці С за аналогічною формулою

$$W_C = (55 \cdot 17 \cdot 0,0027 / 0,46 \cdot 0,82) \cdot 4 = 26,8 \text{ кВт} \cdot \text{год за 1 добу}$$

Економія електроенергії дорівнює

$$\Delta W = W_B - W_C = 51,2 - 26,8 = 24,4 \text{ кВт} \cdot \text{год за 1 добу.}$$

Споживана енергія в номінальному режимі дорівнює

$$W_{\text{ном}} = [(40 \cdot 90 \cdot 0,0027) / 0,74 \cdot 0,82] \cdot 20 = 320,4 \text{ кВт} \cdot \text{год за 1 добу.}$$

Споживана енергія за 1 добу при роботі тривалістю 20 год. номінального режиму і 4 год при частотному регулюванні в точці С

$$W_p = (320,4 + 26,8) \cdot 365 = 126728 \text{ кВт} \cdot \text{год за 1 рік.}$$

Економія електроенергії за 1 рік

$$\Delta W_p = 24,4 \cdot 365 = 8906 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Економія в %  $E\% = (8906 / 126728) \cdot 100 = 7,0$

При сучасній ( 09.2014 р.) ціні 1,34 грн. за 1 кВт год економія у грошовому еквіваленті дорівнює  $E_{\text{грн}} = 8906 \cdot 1,34 \approx 12000 \text{ грн.}$

При вартості перетворювача частоти потужністю 15 – 18 кВт типу ALTIVAR 312 у 25000 грн .термін окупності додаткового електрообладнання не перевищує 2-х років.

Отже, є сенс вибрати станцію захисту і керування укомплектовану напівпровідниковим перетворювачем частоти (НПЧ).

## ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. У варіантах з малими потужностями ( до 7 кВт), з малими глибинами свердловини і коротким трубопроводом економія енергії може бути незначною, такою, що застосування НПЧ є неефективним. У цих випадках для живлення, захисту і керування насоса доцільно вибирати “Пристрій керування і захисту L3” – далі “Пристрій L3”. Для насосів потужністю від 1 до 7,5 кВт вибирають “Пристрій L3” з прямим пуском, для насосів потужністю більше 7,5 кВт вибирають “Пристрій L3” з плавним пуском.

2. У варіантах з суттєвим економічним ефектом, у яких вартість енергії, з’економленої за рахунок запровадження частотного регулювання дозволяє

окупити витрати на додаткове обладнання за 2-3 роки потрібно вибирати частотний перетворювач ALTIVAR 31, 312, 61, 71 або ТРІОЛ 24Е, ТРІОЛ 24Н

**3.** Інформацію про технічні характеристики і схеми вищенаведених пристроїв розміщена у файлах папки “СТАНЦІЇ КЕРУВАННЯ”/

### III КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

#### 5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА. СКЛАДАННЯ СХЕМИ ТА ВИБІР КОМПЛЕКТНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ І ЗАХИСТУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

##### 5.1 Розрахунок механічних і електричних параметрів електродвигуна

Насосний агрегат ЕЦВ 8-40-90 укомплектований асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором типу ПЕДВ 8-17, параметри якого наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри електродвигуна

Тип	Потужність $P_{ном}$ , кВт	$I_{1ном}$ , А	$I_{1ном}/I_{1пуск}$	$\cos \varphi_{ном}$	ККД $\eta_{ном}$	$n_{ном}$ , об./хв	Площа перерізу кабелю, мм <sup>2</sup>
<b>ПЕДВ 8-17</b>	<b>17</b>	<b>38</b>	<b>5</b>	<b>0,82</b>	<b>0,82</b>	<b>2850</b>	<b>10</b>

Для побудови математичної моделі двигуна, крім наведених у таблиці параметрів необхідно знати значення наступних параметрів: активних і реактивних опорів первинної і вторинної обмоток, коефіцієнт максимального моменту, критичне ковзання.

Зважаючи на те, що це двигуни специфічні і повних даних у каталогах шукати марно, будемо визначати наближені значення деяких параметрів методом подібності до електродвигунів загальнопромислової серії 4А еквівалентної потужності.

**ЗАУВАЖЕННЯ.** В каталозі [4] під потужністю  $P_2$  розуміють механічну потужність споживану насосом. В таблиці параметрів електродвигунів потужність АД позначена як  $P_2$ . Але це не потужність, споживана двигуном, а номінальна потужність на валу двигуна. А електрична потужність, споживана двигуном, дорівнює

$$P_1 = P_2 / \eta_{ном} = 17 / 0,82 = 20,73 \text{ кВт}$$

Це підтверджується значенням струму

$$I_1 = P_1 / \sqrt{3} \cdot U_{лін} \cdot \cos \varphi = 20730 / 1,73 \cdot 380 \cdot 0,82 = 38,3 \text{ А.}$$

Саме це значення струму наведене в [4].

Обчислимо значення пускового струму

$$I_n = I_{ном} \cdot 5 = 38,3 \cdot 5 = 191,5 \text{ А.}$$

Обчислимо значення номінального моменту двигуна

$$M_n = 9,55 P_n / n_n = 9,55 \cdot 17000 / 2850 = 57 \text{ Нм.}$$

У двигунів загальнопромислової серії в діапазоні потужностей 1...45 кВт коефіцієнт критичного моменту знаходиться у межах 2,2...2,8 – [2]. Припустимо, що у двигуна ПЕДВ 8-17 при потужності 17 кВт цей коефіцієнт дорівнює  $\lambda_k \approx 2,5$ .

Обчислимо наближене значення критичного ковзання

$$s_k = s_n (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}).$$

За даними таблиці 4.3 знайдемо значення номінального ковзання

$$s_n = (n_0 - n_{ном}) / n_0;$$

$$s_n = (3000 - 2850) / 3000 = 0,05;$$

$$s_k = 0,05(2,5 + \sqrt{6,25 - 1}) = 0,24.$$

Обчислимо значення критичного моменту

$$M_k = \lambda_k \cdot M_n = 2,5 \cdot 57 = 142 \text{ Нм.}$$

Запишемо рівняння механічної характеристики двигуна у вигляді формули Клоса

$$M = \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2M_k \cdot s_k s}{s^2 + s_k^2};$$

$$M = \frac{(2 \cdot 142 \cdot 0,24)s}{s^2 + 0,24^2} = \frac{68,2s}{s^2 + 0,058}$$

Останнє рівняння використаємо для побудови природної механічної і регулювальних характеристик електродвигуна. Ці характеристики будемо в додатку EXCEL за методикою, викладеною у методичних вказівках до лабораторних робіт.

## **5.2 Складання схеми та вибір комплектної системи живлення і захисту насосної установки**

Діапазон потужностей електроприводу для всіх варіантів курсового проекту – від 1,1 *кВт* до 90 *кВт*. Розіб'ємо його на 3 інтервали. Потужності від 1,1 до 7,5 *кВт* будемо вважати малими, потужності 7,5...45 середніми, а потужності більші 45 *кВт* великими.

Схема живлення насосної установки залежить від її потужності. Для варіантів малої потужності доцільно живлення здійснювати від трифазної лінії 380/220 В районних електромереж. Для варіантів середньої та великої потужності доцільно встановити окрему підстанцію або трансформатор 10/0,4 *кВ*.

### **Схема живлення та захист повинна відповідати наступним вимогам:**

- 1.** Забезпечити захист двигуна від коротких замикань, від перевантажень за струмом, від обриву та перекосу фаз, від роботи в режимі “сухого ходу” і в недовантаженому режимі;
- 2.** Для насосних агрегатів потужністю більше 7,5 *кВт* мати можливість плавного пуску насоса;
- 3.** Забезпечити контроль напруги живлення та контроль опору ізоляції;
- 4.** Забезпечити роботу насосного агрегата в ручному, автоматичному і дистанційному режимах;
- 5.** Система керування повинна забезпечувати контроль та підтримання заданого рівня води в резервуарі та тиску в системі водопостачання за сигналами давачів рівня і тиску.

## 5.3 Обґрунтування вибору комплектної системи живлення, захисту та керування насосної установки

### 5.3.1 Загальні зауваження

Світові і національні фірми з випуску електрообладнання, такі як “SIEMENS”, “SCHNEIDER ELECTRIC”, “MITSUBISHI ELECTRIC”, “ТРИОЛ” (російсько-українська) та інші ще з кінця ХХ-го сторіччя виготовляють на продаж тиристорні перетворювачі частоти струму з програмованим логічним контролером для частотно-регульованого асинхронного електроприводу. Ринок електротехнічного обладнання вже давно заповнений електроприводами АД-ТПЧ-ПЛК потужністю від 0,18 кВт до 750 кВт. У першому поколінні майже всі розробники застосовували ТПЧ за схемою “Автономний інвертор напруги з ланкою постійного струму (керований випрямляч)”, зображеної на рис.3.7. У цій схемі випрямляч і інвертор виконувались на силових тиристорах, а керування за законом  $U / f = const$  здійснювалось по двох каналах – напруги у випрямлячі, частоти в інверторі. Згодом на ринку електронних компонентів з’явилися біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT- транзистори, БТІЗ- транзистори), застосування яких дозволило спростити схему перетворювача частоти. В сучасних перетворювачах використовують схеми “некерований діодний випрямляч – широтно-імпульсний модулятор на IGBT-транзисторах”. Переваги IGBT-транзисторів – високий вхідний опір, керування не струмом, а напругою (мала потужність керуючого сигналу), малий спад напруги відкритого транзистора. Діапазон застосування – за струмом 10...1200 А, за напругою від 100 В до 10000 В.

Сучасна схема силового блоку ТПЧ на БТІЗ-транзисторах зображена на рис. 5.1. Схема складається з трифазного мостового випрямляча з фільтром  $LC$  і трифазного ШИМ-модулятора. Керування за законом  $U / f$  здійснюється по одному каналу – в модуляторі амплітудою і частотою модулюючого сигналу, який формується системою керування.



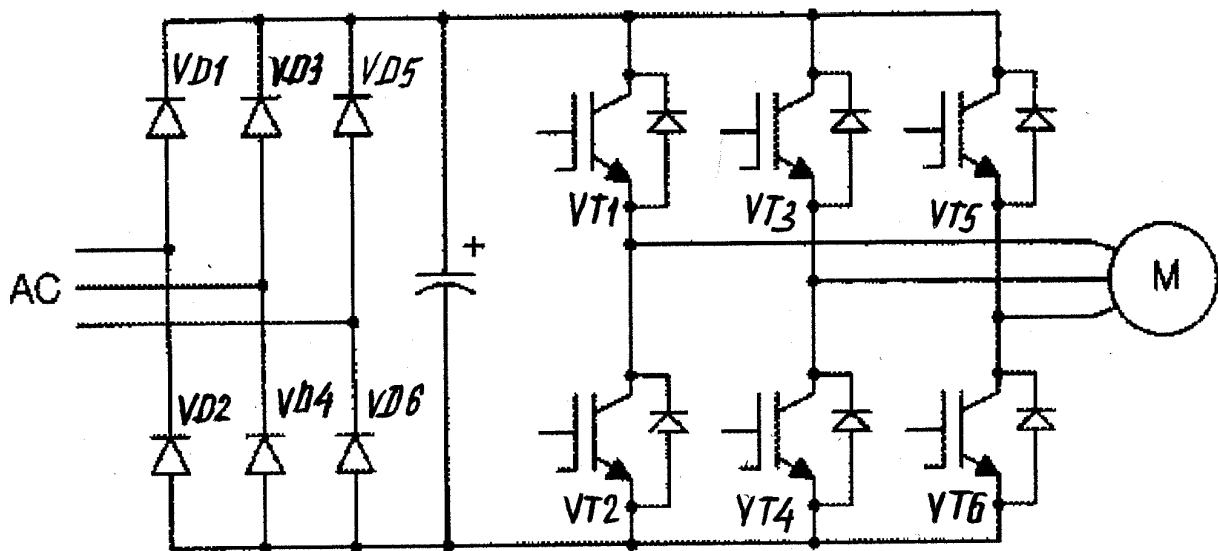


Рисунок 5.1 – Схема перетворювача частоти струму на БТІЗ-транзисторах

Отже, розглянемо пристрої живлення, захисту і керування, які застосовують в сучасних насосних установках систем водопостачання. Насоси свердловинні типу ЕЦВ їх розробники і виробники (ОАО “ЛІВГІДРОМАШ”) рекомендують приєднувати до електричної мережі тільки через станції керування і захисту СУЗ, які виготовляють вони ж. Ці станції виготовляють за широкою номенклатурою потужностей (від 1 кВт до 132 кВт) і функцій, з прямим пуском і плавним пуском, з частотним регулюванням і без нього.

### 5.3.2 Огляд існуючих систем живлення, захисту та керування насосними установками систем водопостачання

#### Станції керування і захисту “HMS Control ST”

Станція керування з каскадно-частотним керуванням “HMS Control ST” призначена для керування групою насосних агрегатів від 1 до 4 у відповідності з сигналами керування. Станції призначені для застосування в системах водопостачання, тепlopостачання та ін. Модельний ряд станцій складається з 21 типорозмірів з потужностями від 0,37 кВт до 132 кВт, модифікаціями з прямим пуском (до 5,5 кВт) і з плавним пуском (від 7,5 кВт до 132 кВт).

Станція виконує функції автоматичного керування рівня і тиску, в режимі водопідймання або дренажа, дистанційного і місцевого керування трифазними електродвигунами глибинних насосів і захисту їх від перевантажень за струмом, коротких замикань, неповнофазного режиму роботи і сухого ходу. В режимі пуску електродвигунів потужністю 7,5...132 кВт станція забезпечує плавний пуск.

В автоматичному режимі станція забезпечує керування за сигналами датчиків верхнього і нижнього рівнів, встановлених у резервуарі, від електроконтактного манометра або реле тиску.

В режимі дистанційного керування станція забезпечує керування по двопровідній лінії (до 2 км). В режимі місцевого керування станція вмикається і вимикається автоматичним вимикачем.

В усіх режимах станція забезпечує:

- вимикання електродвигуна при обриві будь-якої з трьох фаз;
- вимикання електродвигуна при перевантаженні за струмом;
- вимикання електродвигуна при відсутності води у свердловині;
- світлову сигналізацію аварійних станів;
- відновлення роботи після виходу з аварійного стану;
- індикацію споживаного струму в одній з фаз.

Принцип роботи станції керування засований на каскадному вмиканні насосів. На виході насосної установки встановлено аналоговий датчик тиску, сигнал з якого подається на вхід системи керування. На початку роботи виконується перевірка сигналів датчиків (наявність води в насосі, справність датчика тиску і все інше). Якщо сигнали задовільняють умовам пуску, то програма за умови оцінки напрацювання вибирає основний насос (той що має найменше з усіх напрацювання). Основний насос – це той, який в даний момент працює від перетворювача частоти, далі насос-майстер. Інші насоси приєднуються до мережі напряму або через пристрій плавного пуску. Програма ПЛК обирає насос-майстер, приєднує до ТПЧ і починає роботу, регулюючи частоту обертання насоса у відповідності з сигналами датчика тиску,

регульованому ПДД-регулятором. Якщо поточне значення тиску менше значення уставки і насос-майстер працює на максимальній частоті, то через певний проміжок часу програма ПЛК вмикає додатковий насос. І так до того часу, поки тиск у системі не досягне встановленого значення. Через встановлений час програма дає команду на заміну насоса-майстра. Далі ПЛК обирає нового насоса-майстра за умови часу напрацювання і стану насосів. Станція зупиняється, виконується перемикання насоса-майстра і робота відновлюється. Цей принцип забезпечує рівномірне напрацювання всіх насосів в системі. Якщо заданого значення тиску в системі досягнуто і насос працює з мінімальною частотою, програма почне вимикати насоси в залежності від напрацювання і стану.

#### Склад станції “HMS Control ST”:

- Перетворювач частоти;
- Програмований логічний контролер SEGNETICS;
- Система індикації і сигналізації;
- Магнітні пускачі з тепловими реле;
- Органи керування і автомати захисту;
- Пристрій плавного пуску (при потужності двигуна 7,5 кВт і більше);
- Пристрій контролю мережі;
- Пристрій обмеження імпульсних перенапруг;
- Вольтметр на ввіді мережі;
- Амперметр на кожний насос;
- GSM- модем, модуль зв'язку “Modbus”, модуль зв'язку “Profibus”

Виробником пропонується 10 модифікацій станцій з прямим пуском і 10 модифікацій станцій з плавним пуском на потужності від 1.1 кВт до 132 кВт.

#### **Електропривод насосних установок Тріол АТ24\*\*\*-380- Е1000**

Привод Тріол АТ-24 – це універсальна багатофункціональна система живлення, захисту і керування електродвигунами насосів. Електропривод Тріол АТ-24 забезпечує плавний пуск, регулювання частоти обертання двигуна,

тривалу роботу в номінальному режимі, реверсування і гальмування за заданим темпом і підтримання у всьому діапазоні робочих частот номінальних характеристик електродвигуна. Основні функції електроприводу АТ24 такі:

- Пуск, зупинка і регулювання частоти обертання насосів;
- Розгін і гальмування за заданими темпами;
- Реверс, прискорення, сповільнення, зупинка;
- Захист двигуна від струму КЗ і перевантаження;
- Керування насосами від зовнішніх дво- і трипровідних давачів;
- Збереження конфігурації керування двигуном;
- Динамічне гальмування двигуна;
- Керування одночасно 4-ма насосами за програмою “Каскадне керування”

Силовий блок АТ24 виконано за схемою автономного інвертора з проміжною ланкою постійного струму (рис.4.3.) АІН виконано на БТІЗ-транзисторах з керуванням за принципом широтно-імпульсної модуляції з частотою 2-10 кГц. Система керування привода реалізована на сучасному двоядерному контролері. Привод Тріол АТ24 реалізує алгоритм векторного керування потоком двигуна в розімкненій системі, що забезпечує точний контроль за обертовим моментом двигуна, зменшення втрат споживаної енергії.

### **Електроприводи насосних установок ALTIVAR 31 і ALTIVAR 312**

Частотні перетворювачі **ALTIVAR 31 і ALTIVAR 312** призначені для керування трифазними АД потужністю від 0,18 до 15 кВт. Вмонтовані в ПЛК програми дозволяють виконувати всі перелічені вище функції комутації, захисту, регулювання і діагностики двигуна. Крім стандартних функцій перетворювач **ALTIVAR 312** дозволяє реалізувати деякі додаткові функції – застосування в насосних установках енергозберігаючого закону керування та ПІ-регулятора для регулювання тиску за допомогою давача зворотного зв'язку.

Технічні характеристики приводів ALTIVAR 312 наведені на рис. 5.2.

Докладнішу інформацію про комплектні електроприводи насосних установок можна отримати з файлів, вказаних у [7].

<b>Диапазон мощности при частоте сети 50 - 60 Гц (кВт)</b>		<b>0,18 - 4</b>	<b>0,18 - 15</b>	<b>0,75 - 75</b>	
	Однофазная, 100 - 120 В (кВт)	0,18 - 0,75	–	–	
	Однофазная, 200 - 240 В (кВт)	0,18 - 2,2	0,18 - 2,2	–	
	Трехфазная, 200 - 230 В (кВт)	–	–	–	
	Трехфазная, 200 - 240 В (кВт)	0,18 - 4	0,18 - 15	0,75 - 30	
	Трехфазная, 380 - 480 В (кВт)	–	–	0,75 - 75	
	Трехфазная, 380 - 500 В (кВт)	–	0,37 - 15	–	
	Трехфазная, 525 - 600 В (кВт)	–	0,75 - 15	–	
	Трехфазная, 500 - 690 В (кВт)	–	–	–	
<b>Электропривод</b>		<b>Выходная частота</b>	<b>0,5 - 400 Гц</b>	<b>0,5 - 500 Гц</b>	<b>0,5 - 200 Гц</b>
Закон управления	Асинхронный двигатель	Скалярное U/f-регулирование Векторное управление потоком в разомкнутой системе Квадратичный закон Кл <sup>2</sup>	Скалярное U/f-регулирование Векторное управление потоком в разомкнутой системе Энергосберегающий режим	Векторное управление потоком в разомкнутой системе Закон U/f по 2 точкам Энергосберегающий режим	
	Синхронный двигатель	–	–	–	
Переходный момент		150 - 170 % номинального момента двигателя	170 - 200 % номинального момента двигателя	110 % номинального момента двигателя	
<b>Функции</b>					
Количество функций		40	50	50	
Количество предварительно заданных скоростей		8	16	7	
Количество входов-выходов	Аналоговые входы	1	3	2	
	Дискретные входы	4	6	3	
	Аналоговые выходы	1	1	1	
	Дискретные выходы	1	–	–	
	Релейные выходы	1	2	2	
<b>Коммуникационные интерфейсы</b>		<b>Встроенные</b>	<b>Modbus</b>	<b>Modbus и CANopen</b>	<b>Modbus</b>
На заказ		–	CANopen Daisy chain, DeviceNet, PROFIBUS DP, Modbus TCP, Fipio	LonWorks, METASYS N2, APOGEE FLN, BACnet	

Рисунок 5.2 –Технічні характеристики електроприводів ATV 312

## 5.4 Опис технологічної схеми автоматизованої свердловинної системи водопостачання

Свердловинна система водопостачання складається з наступних основних елементів: свердловини, насосної установки з насосом і електродвигуном, системи живлення, захисту і автоматичного керування електродвигуном і насосом. Свердловина характеризується глибиною і дебітом. Підземні води, придатні до споживання, залягають на різних глибинах. У наших варіантах курсового проекту глибини свердловин варіюють у межах 25...80 м. Дебіт свердловини (не плутати з дебетом бухгалтерським) – це кількість води, нафти чи газу, яку за одиницю часу може дати джерело).

У наших варіантах курсового проекту дебіт свердловин варіює у межах 3...200 м<sup>3</sup>/год. Свердловина облаштовується обсадною трубою відповідного діаметра, у яку на відповідну глибину опускають на тросі глибинний насос ЕЦВ

з електродвигуном ПЕДВ. Живлення електродвигуна застосовують через трижильний герметично броньований кабель відповідної струму площі перерізу.

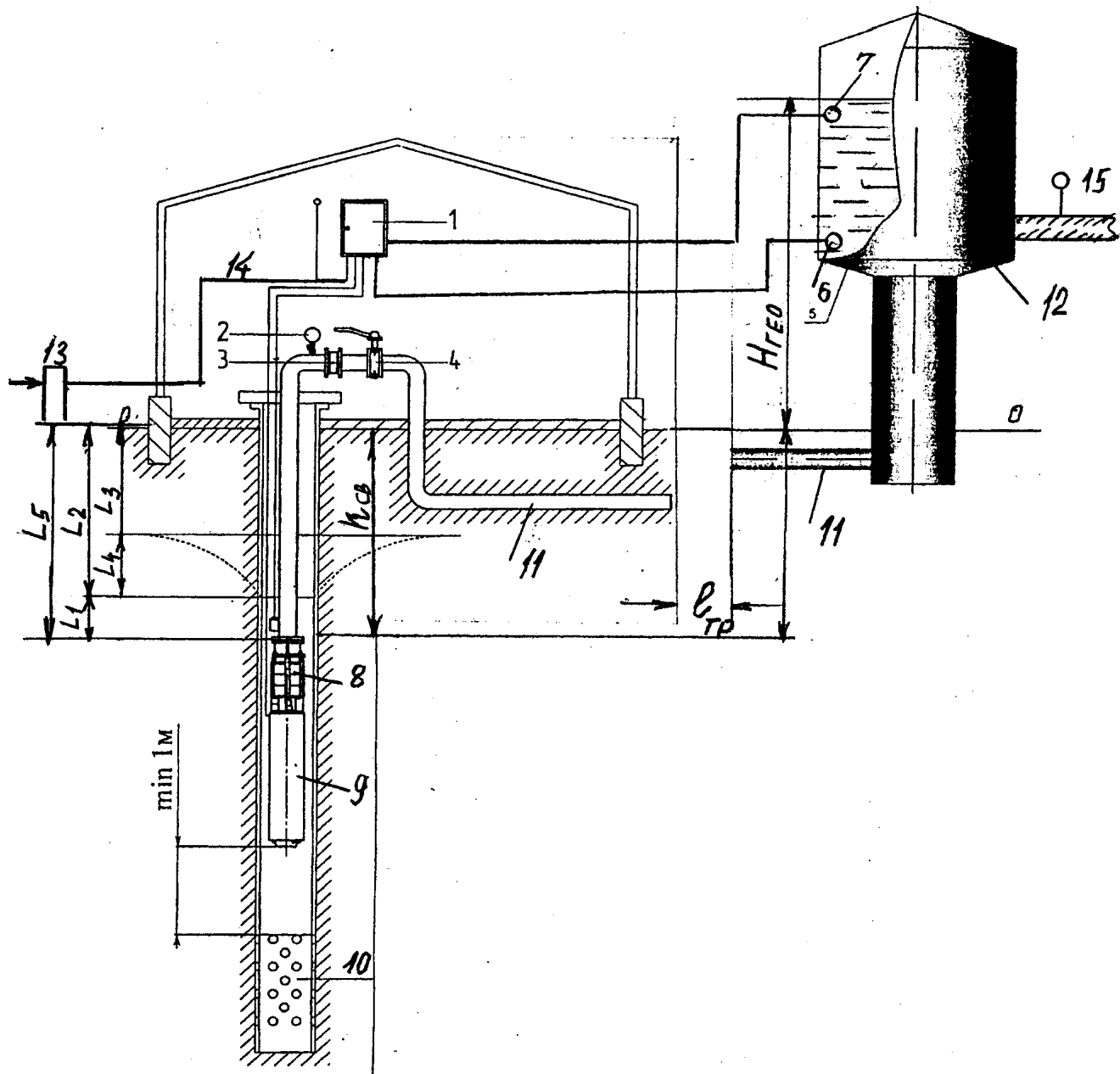


Рисунок 5.3 – Схема технологічна принципова свердловинної системи водопостачання: 1 – станція керування і захисту; 2 – манометр; 3 – клапан зворотний; 4 – засувка; 5 – резервуар; 6 – давач сигналу нижнього рівня; 7 – давач сигналу верхнього рівня; 8 – насос ЕЦВ; 9 – електродвигун ПЕДВ; 10 – фільтр; 11 - трубопровід; 12 – башта; 13 – трансформаторна підстанція; 14 – кабель живлення; 15 – кабель живлення.

Живлення електродвигунів великої потужності здійснюють від трансформаторної підстанції 13, а електродвигунів малої потужності від трифазної лінії електропередачі. Для запобігання перетоку води з резервуара у свердловину на виході з насосу встановлено зворотний клапан 3, а для керування потоком – засувка 4. Для контролю тиску води на виході з насосу встановлено електроконтактний манометр 2. До троса на сигнальному кабелі закріплений давач сигналу “сухого ходу”. Він замикає контакт і дає сигнал на відключення насоса, якщо рівень води у свердловині опуститься нижче допустимого. Для запобігання переливу води з резервуару у нього встановлено давач верхнього рівня 7. Цей давач дає сигнал на вимикання електродвигуна коли рівень води в резервуарі дійде до верхньої межі, а давач нижнього рівня дає сигнал на ввімкнення електродвигуна коли рівень води понизиться до нижньої межі. На виході з насосу встановлено контрольний манометр 2 (давач тиску), а на виході з резервуару ( на вході у розподільну мережу) давач тиску 15.

**ПД-регулятор.** Задача насосної станції полягає у підтриманні заданого тиску у розподільній мережі. Давач 15 є давачем сигналу зворотного зв'язку у системі регулювання тиску в системі водопостачання, тобто напруга на його виході пропорційна тиску. Ця напруга подається на вхід регулятора, де порівнюється з напругою заданого сигналу. В момент їх рівності тиск в системі дорівнює заданому. Водорозбір у системі неперервно змінюється, за тим же законом змінювався би й тиск, якби не було регулятора тиску. Регулятор тиску за певним законом керує насосом, який за тим же законом наповнює резервуар. Таким законом є пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання, а регулятор, який реалізує цей закон називають ПД-регулятором. Закон регулювання – це закон, за яким змінюється вихідний (керуючий) сигнал регулятора в часі. Типовим задаючим сигналом, який подають на вхід регулятора, є ступінчастий сигнал. Це сигнал постійної напруги. Якщо його подати на вхід операційного підсилювача, то на виході отримаємо такий самий за формою сигнал, тільки більший, чи менший за рівнем. Такий підсилювач

можна назвати пропорційним регулятором. Якщо в операційному підсилювачі є інтегруюча ланка, то вона проінтегрує вхідний сигнал, а у вихідному сигналі до пропорційної складової добавиться інтегральна складова. Тепер це буде ІІІ-регулятор. Інтегральна складова змінює властивості ІІІ- регулятора. Пропорційна складова забезпечує швидкодію відпрацювання вихідної величини, а інтегральна складова зменшує статичну похибку. Наявність диференціальної складової в ІІІД-регуляторі дозволяє ще збільшити швидкодію. В сучасних системах керування функції ІІІД- регулятора виконує програмований логічний контролер ПЛК (PLC), який отримує інформацію від давачів тиску, давачів рівня, давачів швидкості потоку, температури та інших елементів автоматики, зображених на рис.5.4.

На рисунку 5.4: 1 – поплавковий вимикач рівня Н 07 RN, призначений для захисту насоса від сухого ходу; 2 – манометр показуючий і сигналізуючий типу ДМ2010Cr- 0,6 МПа, має дві пари контактів – 1 пару на розімкнення (НЗ) і 1 пару на замкнення (НР); манометр показуючий і сигналізуючий типу ДМ2010Cr- 1,0 МПа; манометр показуючий і сигналізуючий типу ДМ2010Cr- 1,6 МПа; 3 – реле тиску РМ/5; РМ/12 встановлюється в напірній лінії, для регулювання і контролю тиску, робочий тиск 0,1...0,5 МПа та 0,3...1,2 МПа, має 2 контакти НЗ (нормально замкнених), струм комутації 10 А, напруга 250 В; 4 – реле тиску LP – застосовують як реле сигналізації і вимикання при сухому ході, має 2 нормально-замкнених (НЗ)контакта; 5 – реле потоку, призначається для контролю потоку води в трубопроводі; 6 – Перетворювач тиску в уніфікований сигнал постійного струму 4-20 мА типу МТ100-У2, має модифікації на діапазони 0...0,6 МПа; 0...1,0 МПа; 0...1,6 МПа; 7 – електродний давач сигналу сухого ходу, застосовують для захисту глибинного насоса від сухого ходу.



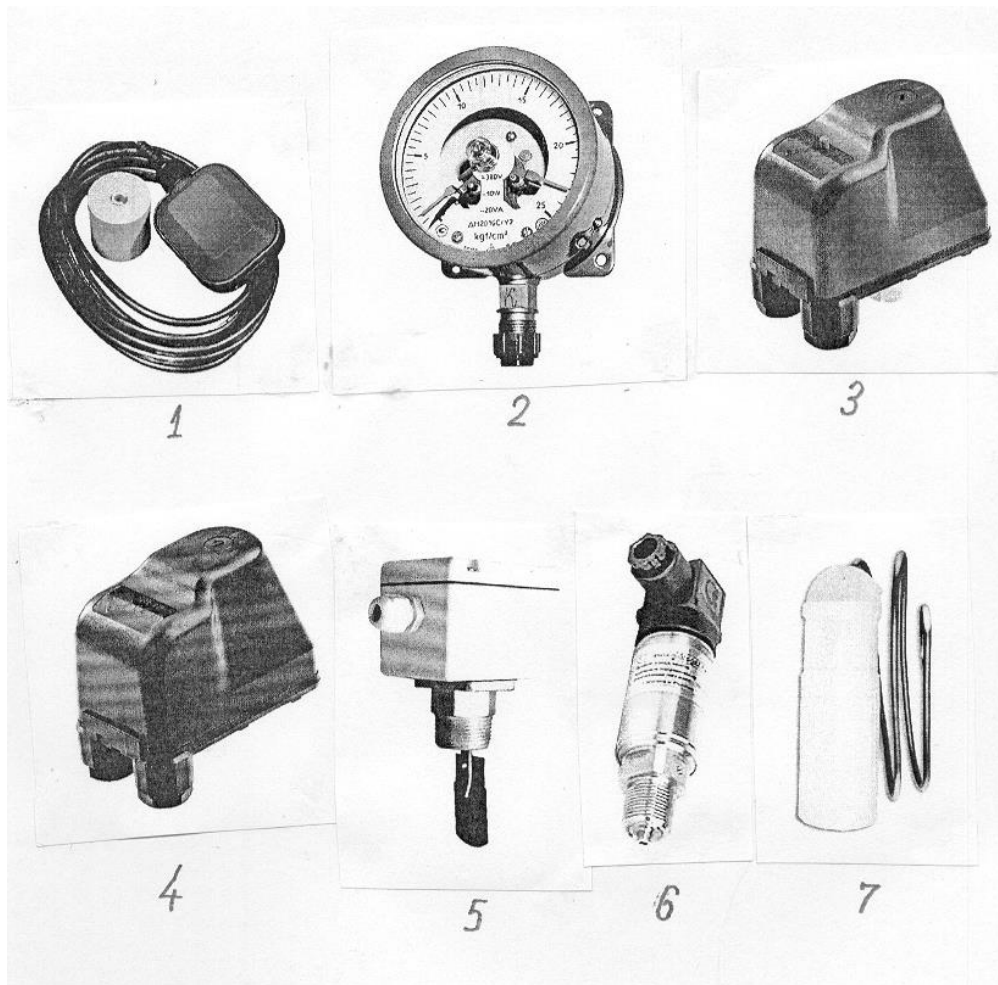


Рисунок 5.4 – Елементи автоматики насосних систем

### **5.5 Схема живлення, керування і захисту автоматизованої системи водопостачання**

Електрична схема станції залежить від потужності насоса. Залежно від номеру варіанта потужність насоса знаходиться у межах від 1,1 *кВт* до 100 *кВт*. Найпростішою є схема живлення і керування насосом малої потужності з прямим пуском і без частотного регулювання. У цих варіантах для живлення і керування насосною установкою вибирають “Пристрій керування і захисту L3” – далі “Пристрій L3” з прямим пуском. Для цих випадків “Схема електрична принципова живлення, керування і захисту насосної установки” має вигляд, зображений на рис. 5.5.

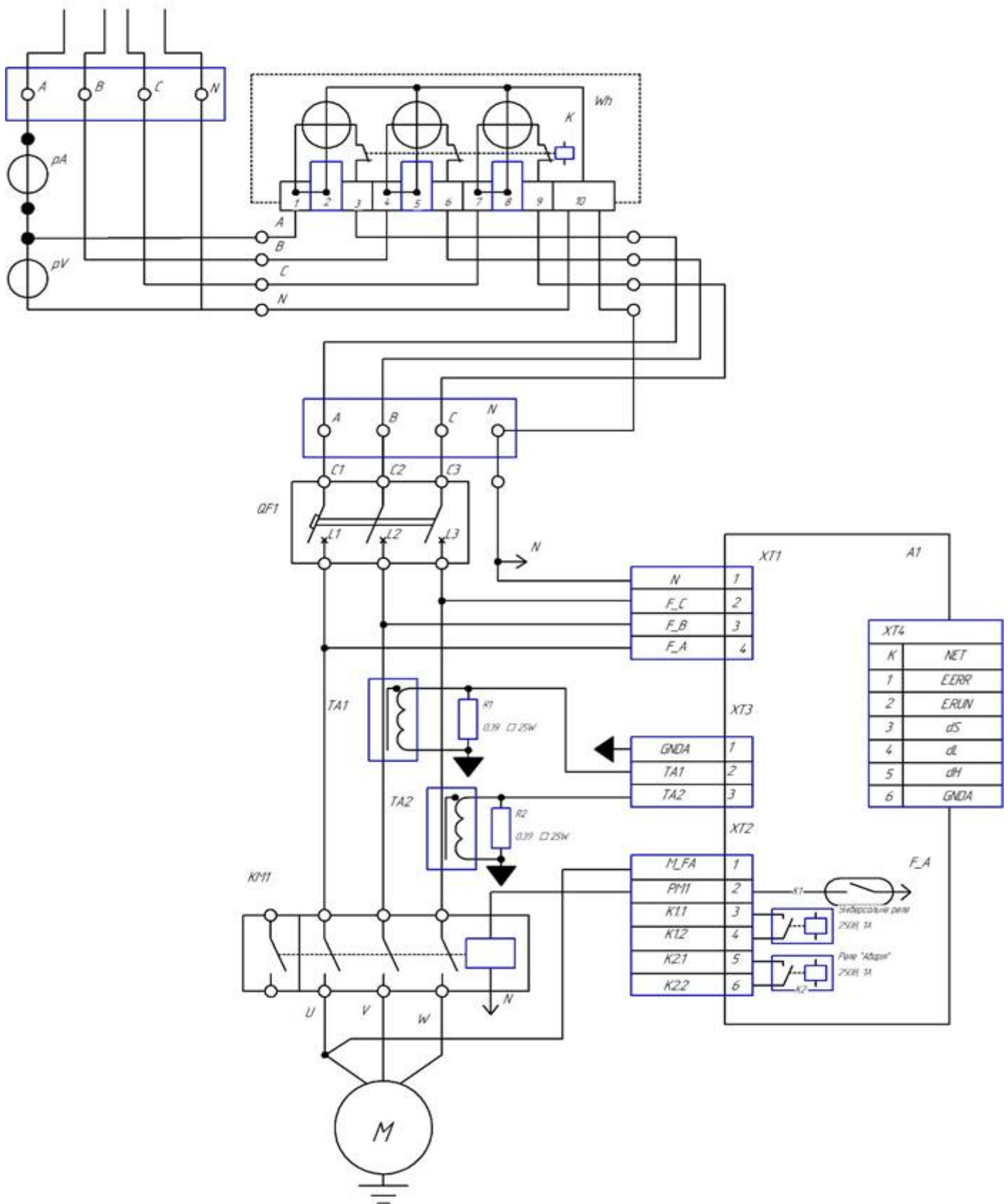


Рисунок 5.5 – Схема електрична принципова “Пристрою керування і захисту L3”: *QF1*- вимикач автоматичний; *KM1* – контактор електромагнітний; *A1* – пристрій керування і захисту; *TA1*, *TA2* – вимірювальні трансформатори струму; *M* – електродвигун ; *pA* – амперметр; *pV* – вольтметр; *Wh* – лічильник трифазний НІК2303

Кожен варіант цієї схеми відрізняється потужністю електродвигуна, а значить номінальним і пусковим струмом. Тому в кожному варіанті необхідно розрахувати площу перерізу проводу живлення, вибрати відповідний провід, автоматичний вимикач та електромагнітний контактор. Приклади розв'язання такої задачі розглянуті в [8].

### **Специфікація до схеми рисунку 5.5**

1. Електродвигун ЕЦВХ –хх-хх (дані за варіантом);
2. КМ1 – контактор електромагнітний (дані за варіантом);
3. QF1 – вимикач автоматичний (дані за варіантом);
4. Wh – лічильник енергії трифазний НІК 2303;
5. pA – амперметр;
6. pV – вольтметр;
7. ТА1 – трансформатор струму (тип за варіантом);
8. ТА2 – трансформатор струму (за варіантом);
9. А1 – пристрій керування L3 мікропроцесорний.

### **Специфікація до схеми рис. 5.6**

1. Електродвигун ЕЦВХ –хх-хх (дані за варіантом);
2. КМ1 – контактор електромагнітний (дані за варіантом);
3. QF1 – вимикач автоматичний (дані за варіантом);
4. Wh – лічильник енергії трифазний НІК 2303;
5. pA – амперметр;
6. pV – вольтметр;
7. ТА1 – трансформатор струму (тип за варіантом);
8. ТА2 – трансформатор струму (за варіантом);
9. А1 – пристрій керування L3 мікропроцесорний;
10. А2 – пристрій плавного пуску (дані за варіантом).

Крім специфікації, яку виносять у рамку, потрібно дати пояснення до схеми на полі креслення.

**В пояснювальній записці на кількох аркушах потрібно дати скорочений опис вибраного пристрою у такій послідовності:**

**1.** Опис і робота пристрою:

- призначення пристрою,
- технічні характеристики,
- виконувані функції;

**2.** Використання:

- режими роботи – ручний, автоматичний, дистанційний;
- органи керування,
- робота з зовнішніми пристроями – пристроєм плавного пуску, давачами сигналів сухого ходу, нижнього рівня, верхнього рівня, ПД-регулятором,

**3.** Схеми приєднання давачів і виконавчих механізмів;

**4.** Порядок пуску і виходу на робочий режим

Для варіантів потужністю двигуна більше 7,5 кВт і без частотного перетворювача необхідно застосовувати пристрій плавного (“м’якого”) пуску. У варіантах з частотним перетворювачем плавний пуск двигуна забезпечується програмою функції розгону.

Пусковий струм двигуна перевищує робочий номінальний у 5-7 разів. Це призводить до спаду напруги у мережі, що негативно впливає не тільки на роботу інших електроприймачів, але й самого двигуна. Тривалість пуску зростає, обмотки його перегріваються, ізоляція старіє, технічний ресурс двигуна скорочується. Нестабільність момента на валу двигуна при пуску призводить до ударних навантажень на зубці шестерен редуктора, зрізанню шпонок і, навіть, до скручування валу.

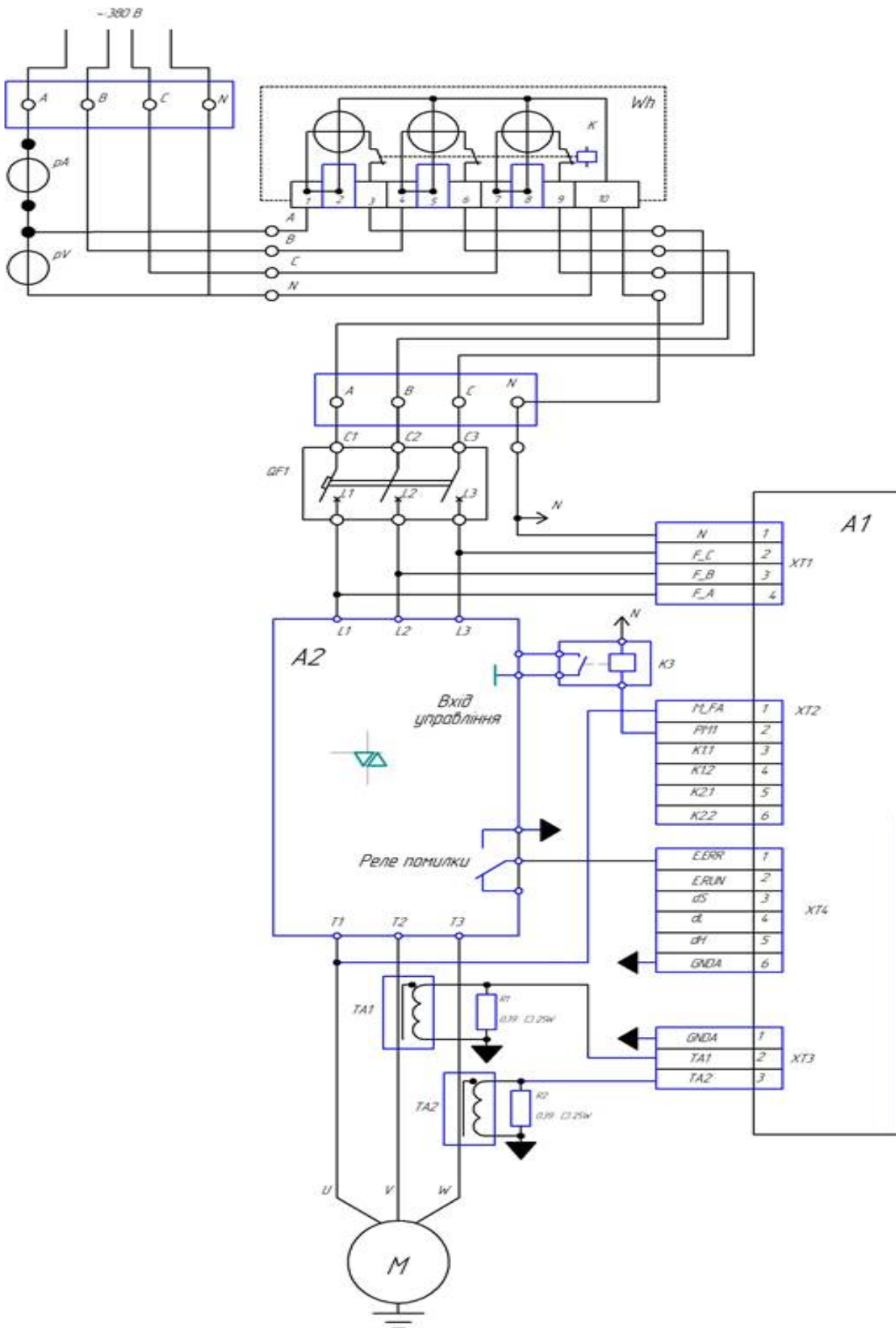


Рисунок 5.6 – Схема електрична принципова “Пристрою керування і захисту L3”: *QF1*- вимикач автоматичний; *KM1* – контактор електромагнітний; *A1* – пристрій керування і захисту; *A2* – пристрій плавного пуску; *TA1*, *TA2* – вимірювальні трансформатори струму; *M* – електродвигун ; *pA* – амперметр; *pV* – вольтметр; *Wh* – лічильник трифазний НІК2303

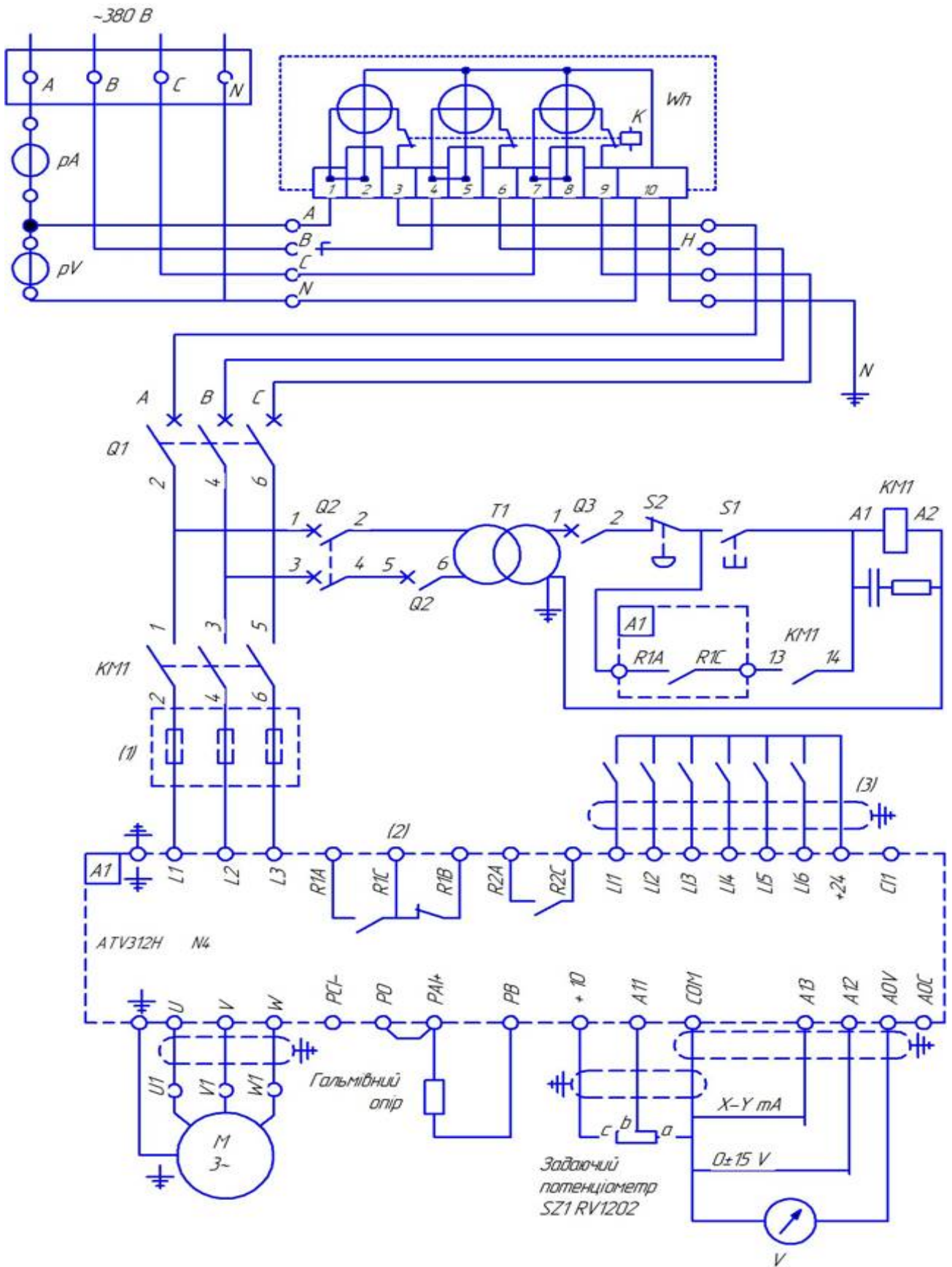


Рисунок 5.7 – Схема електрична принципова електроприводу з частотним перетворювачем типу ATV 312

Пристрій плавного пуску двигуна значно зменшує пускові навантаження на робочий механізм. Крім плавного пуску, цей пристрій забезпечує плавне гальмування насоса, що дозволяє уникати гідравлічних ударів у мережі водопостачання, які призводять до аварій.

У варіантах курсового проекту потрібно вибрати тип серійного пристрою плавного пуску, який за струмом і потужністю відповідає параметрам електродвигуна. Для вибору пристрою плавного пуску потрібно переглянути файли папки [8].

Для варіантів з застосуванням частотного регулювання схема електрична принципова електроприводу має вигляд, зображений на рис. 5.7.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Решетник В. Конспект лекцій з дисципліни «Основи електроприводу» для студентів денної і заочної форм навчання напряму 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” / Віктор Решетник, Тетяна Концограда // ТНТУ ім. І. Пулюя. - Тернопіль : 2017. - 151 с
2. Савченко П.І., Лавріненко О.Ю. Основи електроприводу: підручник / Савченко П.І., Лавріненко О.Ю., Синявський О.Ю., Войтюк В.В., Савченко І.М., Голодний І.М. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017 – 524 с.
3. Василега, П.О. Електропривод робочих машин: навчальний посібник / П.О. Василега, Д.В. Муріков. - Суми: Університетська книга, 2019. - 228 с.
4. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госпва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018.
5. Лисиченко М.Л., Савченко П.І., Тищенко О.К., Гузенко В.В. Електропривод. Посібник до виконання лабораторних та практичних занять – Харків: Факт, 2015. – 270 с.
6. Решетник В. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Основи електроприводу» для студентів денної і заочної форм навчання напряму 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” / Віктор Решетник, Тетяна Концограда // ТНТУ ім. І. Пулюя. - Тернопіль: 2017. – 54 с.
7. Слабий Б. Л. Приклади розв'язування задач з економії електричної енергії: . Навчально- методичний посібник; Вид-во ТНТУ, Тернопіль, 2004 – с.210. : іл.



## ЗМІСТ

<b>Вступ</b>	<b>5</b>
<b>I ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>7</b>
<b>1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТИВ. НАСОСИ І НАСОСНІ СТАНЦІЇ</b>	<b>7</b>
Загальні відомості про системи водопостачання	7
<b>2 ВІДЦЕНТРОВИЙ НАСОС ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ</b>	<b>10</b>
2.1 Основні поняття і визначення	10
2.2 Подача, напір і потужність відцентрових насосів	11
2.3 Характеристика насоса	13
2.4 Характеристика системи і робочий режим насоса	15
2.5 Керування насосним агрегатом	17
2.6 Регулювання подачі відцентрових насосів	18
<b>3 АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ (АДКР) ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ. СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ І МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ АДКР</b>	<b>21</b>
3.1 Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором як об'єкт керування	21
3.2 Регулювання частоти обертання АДКР	27
3.3 Апаратурна реалізація частотного методу регулювання АД	29
<b>II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>33</b>
<b>4 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ . ВИБІР ТИПОРОЗМІРУ НАСОСА. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗАВОДСЬКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСА. ПОБУДОВА ЧАСТОТНОЇ РЕГУЛЮВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСА. ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ</b>	<b>33</b>
4.1 Технологічна схема свердловинної системи водопостачання	33
4.2 Вибір типу та розміру насоса за вихідними даними варіанту	34
4.3 Аналіз характеристик насоса	37

4.4 Побудова регулювальних характеристик насоса і розрахунок втрат потужності при дросельному і частотному регулюванні	39
ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	43
<b>ІІІ КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b>	<b>45</b>
<b>5. СКЛАДАННЯ СХЕМИ ТА ВИБІР КОМПЛЕКТНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ І ЗАХИСТУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ</b>	
5.1 Розрахунок механічних і електричних параметрів електродвигуна	45
5.2 Складання схеми та вибір комплектної системи живлення і захисту насосної установки	47
5.3 Обґрунтування вибору комплектної системи живлення, захисту та керування насосної установки	48
5.3.1 Загальні зауваження	48
5.3.2 Огляд існуючих систем живлення, захисту та керування насосними установками систем водопостачання	49
5.4 Опис технологічної схеми автоматизованої свердловинної системи водопостачання	53
5.5 Схема живлення, керування і захисту автоматизованої системи водопостачання	57
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>	<b>64</b>