

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, -
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2021 р

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Розробка автоматизованого асинхронного електроприводу насосної
установки

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕЛКЗ-17
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Шевчук Родіон Сергійович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник доц. каф., к.ф-м.н., доц. Любименко О. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент канд. техн. наук, доц., доц. каф.

АТ Поцєпаєв В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль:

Любименко О. М.

(підпис)

02.06.2021

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній
кваліфікаційній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

(підпис)

02.06.2021

(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Шевчуку Родіону Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка автоматизованого асинхронного електроприводу
насосної установки»

керівник роботи доц. каф., к.ф-м.н., доц. Любименко О. М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 2 червня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____

Продуктивність насоса

напір

тип системи керування:

скалярний зі зворотнім зв'язком за тиском

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Загальна характеристика насосних установок

Розрахунок електроприводу насосної установки

Моделювання автоматизованої системи електроприводу насосної установки

Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Любименко О. М.		
Охорона праці	Біла Н. С.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	03.05.21 – 12.05.21	
2.	Розділ 2	13.05.21 – 23.05.21	
3.	Розділ 3	24.05.21 – 27.05.21	
4.	Охорона праці	28.05.21 – 31.05.21	
5.			
6.			

Студент _____ Шевчук Р. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Любименко О. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Шевчук Родіон Сергійович. Розробка автоматизованого асинхронного електроприводу насосної установки / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає три розділи, висновків, списку використаних джерел та додатку.

У першому розділі розглянуті загальні питання щодо насосних установок, наведена класифікація насосів, вивчено конструктивні особливості відцентрових насосів.

У другому розділі виконаний розрахунок та вибір приводного двигуна насосної установки, визначені параметри схеми заміщення, побудовані електромеханічні та механічні характеристики двигуна, розраховані енергетичні показники електроприводу.

У третьому розділі виконаний синтез системи керування електроприводу насосної установки, проведені налаштування регулятора тиску на модульний оптимум, виконані дослідження комп'ютерної моделі електроприводу.

Ключові слова: насос, скалярна система керування, контур регулювання, асинхронний двигун, електропривод, перехідний процес, навантаження.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАСОСНИХ УСТАНОВОК	7
1.1 Основні поняття про насоси. Класифікація насосів	7
1.2 Насосні установки	9
1.3 Насосні станції.....	10
1.4 Класифікація насосів.....	10
1.5 Принцип роботи та будова відцентрових насосів	11
1.6 Привод насосної установки	15
1.7 Регулювання електроприводом насоса	17
1.7.1 Регульований електропривод по схемі асинхронно-вентильного каскада.....	17
1.7.2 Частотно-керований електропривод.....	20
1.7.3 Регульовальні властивості керованого електроприводу	27
2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	32
2.1 Розрахунок та вибір двигуна	32
2.2 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.....	33
2.3 Побудова електромеханічних та механічних характеристик	36
2.4 Розрахунок енергетичних показників електроприводу.....	44
3 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	46
3.1 Синтез системи керування.....	46
3.1.1 Налаштування регулятора тиску на модульний оптимум.....	47
3.2 Моделювання системи електроприводу	50
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55
ДОДАТОК А ОХОРОНА ПРАЦІ.....	56

ВСТУП

Система регульованого електроприводу в насосних установках застосовується в тих випадках, коли необхідно привести у відповідність режим роботи насоса з режимом роботи водопровідної мережі. Водоспоживання більшості споживачів безперервно змінюється в часі по випадково-імовірнісним законам. Діапазон зміни водоспоживання досить широкий. Щоб відстежувати ці зміни, необхідно безперервно регулювати режим роботи насосної установки.

Процес регулювання ускладнений невідповідністю характеристик відцентрових насосів і трубопроводів. Для збільшення подачі води по трубопроводу натиск на насосній станції необхідно збільшувати, однак характеристики відцентрових насосів такі, що напір падає при збільшенні подачі. При зменшенні ж подачі води натиск збільшується. Тому в періоди зменшеного водоспоживання система працює з надлишковим напором і його доводиться гасити на засувках і дроселюючих пристроях. Це призводить до надмірного споживання електроенергії, виникнення проривів труб і додатковим витокам. Помічено, що найбільш часто аварії, пов'язані з проривом труб в комунальній сфері, трапляються в нічний час, коли різко падає водоспоживання.

В даний час регульовані електроприводи насосних установок задіяні в основному для процесів збагачення корисних копалин, в оборотних системах водопостачання, для подачі чистої води, як для населення містоутворюючих підприємств, так і для технологічних потреб.

Метою роботи є розрахунок та моделювання автоматизованого електроприводу насосної установки.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАСОСНИХ УСТАНОВОК

1.1 Основні поняття про насоси. Класифікація насосів

Насос – це гідравлічна машина, в якій підводиться ззовні енергія (механічна, електрична та ін.) і перетворюється в енергію потоку рідини. За допомогою насоса рідина може бути піднята на певну висоту або переміщена по будь-якій трубопроводній системі.

Насоси класифікують за різними ознаками: принципом дії, виду енергії, що підводиться, конструкції, призначенням, роду рідини і ін.

В основу класифікації за принципом дії покладені відмінності між насосами в механізмі передачі підводиться ззовні енергії потоку рідини, що протікає через них. Тому значною мірою така класифікація ^ відображає відмінності в конструкціях насосів. За принципом дії насоси, які можна використовувати на об'єктах агропромислового комплексу, умовно ділять на дві групи: динамічні й об'ємні.

У динамічних насосах рідині надається енергія в результаті силового впливу робочого органу в робочій камері на неї, постійно сполученої з їх входом і виходом. До цієї групи відносять такі насоси:

1. лопатеві (відцентрові, діагональні і осьові), в яких постійний силовий вплив на рідину, яка протікає через насос надають обтічні нею лопаті обертового робочого колеса;
2. вихрові, в них постійний силовий вплив на рідину, яка протікає через насос надають вихори, що відходять від канавок обертового робочого колеса;
3. струменеві, в них постійний силовий вплив на рідину, яка переміщується через насос надає підведений ззовні струмінь рідини, пари або газу, що володіє високою кінетичною енергією;
4. вібраційні, в яких силовий вплив на рідину надає клапан-поршень, що здійснює високочастотне зворотно-поступальний рух;

5. повітряні водопідйомники (ерліфти), в яких постійне силовий вплив па водоповітряних суміш (утворюється в водопідйомною трубі в через подачу в нижню її частину стисненого повітря) надає вода в свердловині. Вода, що має велику щільність, виштовхує водоповітряних суміш з водопідйомною труби на поверхню землі.

В об'ємних насосах рідина набуває енергію в результаті впливу на неї робочого органу, періодично змінює обсяг робочої камери, поперемінно сполученої з їх входом і виходом. До цієї групи відносять такі насоси:

1. поршневі і плунжерні, в яких періодичне силовий вплив на протікає через насос рідина надають поршень або плунжер, які вчиняють зворотно-поступальний рух в робочій камері;
2. роторні, в яких періодичне силовий вплив на протікає через насос рідина надають поверхні шестерень або гвинтових канавок, розташованих на периферії ротора;
3. крильчасті, в яких періодичне силовий вплив на протікає через насос рідина надає пластина (крило), яка здійснює зворотно-поворотний рух в рабчей камері;
4. стрічкові та шнурові водопідйомники, в яких силовий вплив на рідину в поверхневих капілярах (є робочою камерою) нескінченної стрічки або нескінченного шнура рухаються по двох шківів (один опущений в воду, а інший розташований на поверхні землі), надає підйомна сила, що виникає в наслідок примусового обертання одного з шківів;[1]
5. гідротарани, в яких періодичне силовий вплив на воду в робочій камері надає гідравлічний удар, що виникає в трубопроводі, що підводить при різкій зупинці рідини в ньому.

До групи об'ємних насосів можна включити діафрагменні і шнекові насоси, черпакова водопідйомники, водопідймальні колеса. В основу їх дії покладені одні й ті ж принципи.

1.2 Насосні установки

Насосна установка - це пристрій, рідини від джерела до споживача за допомогою насоса. Вона включає в себе насос, двигун, пристрій для передачі потужності від двигуна до насоса, що всмоктує і напірний трубопровід.

Насос, двигун і пристрій для передачі потужності від двигуна до насоса, зібрані в єдиний вузол, називають насосним агрегатом.

Всмоктуючий і напірний трубопровід насосних установок можуть бути обладнані арматурою (засувки, зворотні клапани, монтажні вставки і ін.) І засобами виміри (вакуумметри, манометри, витратомірного пристрої та ін.).

Відстань по вертикалі від рівня води в джерелі (нижній б'єф) до осі горизонтальних, осі повороту лопатей вертикальних осьових, осі напірного патрубку вертикальних відцентрових, верхнього розташування поршня вертикальних поршневих насосів зветься геометричною висотою всмоктування

Насосні установки можуть мати як позитивну, так і негативну висоту всмоктування. Якщо зазначені осі насосів розташовані вище рівня води в джерелі, то висота всмоктування буде позитивною, якщо ж вони розташовані нижче рівня води в джерелі, то висота всмоктування буде негативною.

Насосні установки, як правило, включають при заповнених водою всмоктуючому трубопроводі і насосі. При позитивній висоті всмоктування насос і усмоктувальний трубопровід заповнюються водою за допомогою вакуумних систем або заливають воду через спеціальну горловину в насосі (при наявності на початку усмоктувального трубопроводу прийомного зворотного клапана).

Відстань по вертикалі від рівня води в водоприймачі (верхній б'єф) до зазначених вище осей і відміток насосів називають геометричною висотою нагнітання. Цю висоту вважають позитивною, якщо зазначені осі і позначки насосів розташовані нижче рівня води у верхньому б'єфі, і негативною, якщо вони розташовані вище рівня води у верхньому б'єфі.

1.3 Насосні станції

У насосній станції, як правило, розміщують кілька насосних установок, кожен з яких можна включити або відключити в залежності від необхідної подачі води. Насосною станцією можна назвати також і одиничну насосну установку, розташовану на рухомій платформі або плавучому понтоні і має ряд додаткових пристроїв для пуску і регулювання режиму роботи.

Насосні станції класифікують за різними ознаками: призначенням, подачі, розташуванню щодо вододжерела (берегові, руслові, стаціонарні, пересувні), будівельним особливостям споруд (заглиблення, незаглиблений, з суміщеними і несуміщення водозаборами і водовипус-ками) ит. д. *

Насосні станції меліоративних і водогосподарських систем агропромислового комплексу поділяють на зрошувальні, осушувальні, сільськогосподарського водопостачання, каналізаційні, дренажні (для зниження рівня ґрунтових вод), які перекачують стоки тваринницьких комплексів.

1.4 Класифікація насосів

Лопатеві насоси завдяки високій надійності, економічності, зручності експлуатації, малим габаритам і відносно низькій вартості знайшли широке застосування у всіх сферах життя сучасного суспільства, і зокрема в меліоративних і водогосподарських системах агропромислового комплексу. Класифікують їх за різними ознаками: характеру руху рідини в проточній частині насоса; конструкції; призначенням та ін.

Лопатеві насоси підрозділяють:

1. за формою робочого колеса - на відцентрові, діагональні і осьові;
2. розміщенням валу - на горизонтальні, вертикальні і похилі;

3. по числу робочих коліс - на одноступінчасті і багатоступінчасті;
4. за напором - на низьконапірні ($H < 20$ м), середньонапірні ($H = 20 \dots 60$ м) і високонапірні ($H > 60$ м);
5. за родом рідини і призначенням - для перекачування води, що містить відносно невелику кількість твердих частинок і хімічно агресивних домішок, температурою менш 100°C ; для перекачування гідросумішей, що містять значну кількість піску, ґрунту та інших твердих частинок; для перекачування забруднених (наприклад, фекальних) рідин; для перекачування хімічно активних рідин; для підйому води з свердловин.[2]

1.5 Принцип роботи та будова відцентрових насосів

У відцентрових насосах (рис. 1.1) рідина рухається в осьових напрямках від всмоктувального патрубку до центральної частини робочого колеса. У робочому колесі її потік повертає на 90° і симетрично відносно осі обертання розтікається по каналах обертового колеса, утвореним стінками переднього і заднього дисків 10 і робочими лопатями 2. Робочі лопаті передають рідині енергію. Статичний тиск в ній і її швидкість зростають. Із робочого колеса 1 потік рідини тече під деяким кутом до дотичній його зовнішнього діаметра. Загальний напрямок руху потоку при цьому збігається з напрямком обертання робочого колеса. Далі по спіральному підводу 3 рідина надходить в конічний дифузор 4, де її кінетична енергія переходить в потенційну.

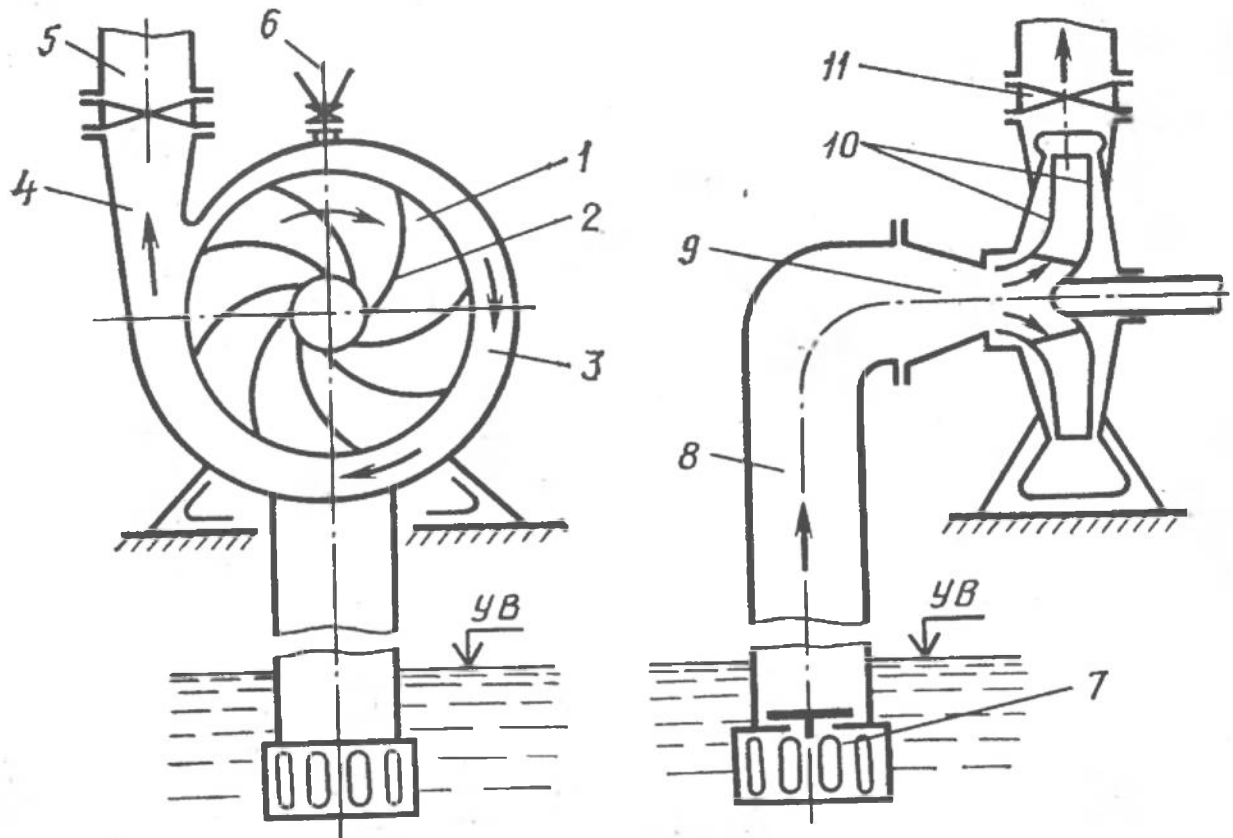


Рисунок 1.1 – Схема відцентрового насоса:

1 - робоче колесо; 2 - лопать; 3 - спіральний відвід; 4 - конічний дифузор; 5 - напірний підвід; 6 - воронка для заливання насоса або місце під'єднання вакуум-насоса; 7 - приймальний зворотний клапан з сіткою; 8, 9 - усмоктувальні трубопровід і патрубок; 10 - диски робочого колеса; 11 – засувка

Підводом називають частину проточною порожнини відцентрового насоса, що підводить переміщувану рідину до вхідного отвору робочого колеса. Призначення підводу - підвести потік рідини до робочого колеса з рівномірним розподілом швидкості по всьому перетину, це необхідно для створення сталого руху рідини в каналах робочого колеса. Для забезпечення більшої стійкості потоку в підвідному каналі необхідно створити швидкості, поступово наростаючі від всмоктувального патрубка до входу в колесо. Розміри всмоктувального патрубка визначаються по перетину трубопроводу, що підводить на основі гідравлічного розрахунку. Для вирівнювання поля швидкостей по

перетину потоку безпосередньо перед входом в робоче колесо розташовують конфузор, що підвищує швидкості потоку на 15-20%.

Робоче колесо являє собою обмежену двома поверхнями обертання камеру, в якій розташована система лопатей. Колесо складається з двох дисків - провідного і веденого, між якими закріплені вигнуті лопаті. Провідне колесо кріпиться до валу 4 (рис. 1.1) двигуна. При обертанні робочого колеса лопаті призводять протікає потік рідини в обертальний рух, збільшуючи цим його механічну енергію. Вхідним перетином робоче колесо примикає до підводу, а вихідним перетином - до відведення. Загальний вигляд робочого колеса відцентрового насоса з одностороннім входом наведено на рис. 1.2.

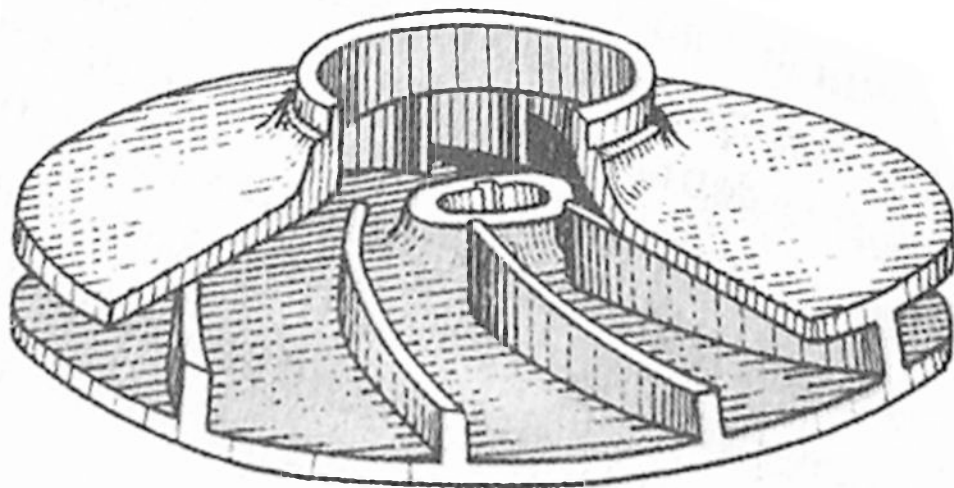


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд робочого колеса відцентрового насоса з одностороннім входом

Щодо відведення рідини направляється від робочого колеса до напірного патрубку або (в багатоступневих насосах) до наступного колеса. Завдання відведення - зібрати потік після проходження ним робочого колеса і перетворити його кінетичну енергію в потенційну з найменшими втратами.[3]

З робочого колеса рідина виходить з великою швидкістю, і щоб уникнути великих втрат напору подавати її безпосередньо в трубопровід не слід.

Відомі три основних типи відводів:

кільцевої, що представляє собою циліндричний простір постійної ширини, що охоплює робоче колесо, при цьому форма поперечного перерізу каналу відведення може бути різною (рис. 1.3);

спіральний, являє собою комбінацію кільцевого відведення з криволінійним дифузorzом (рис. 1.1);

лопатковий, зазвичай використовується в багатоступеневих машинах і являє собою систему кількох дифузorzних каналів, що оточують робоче колесо (рис. 1.4).

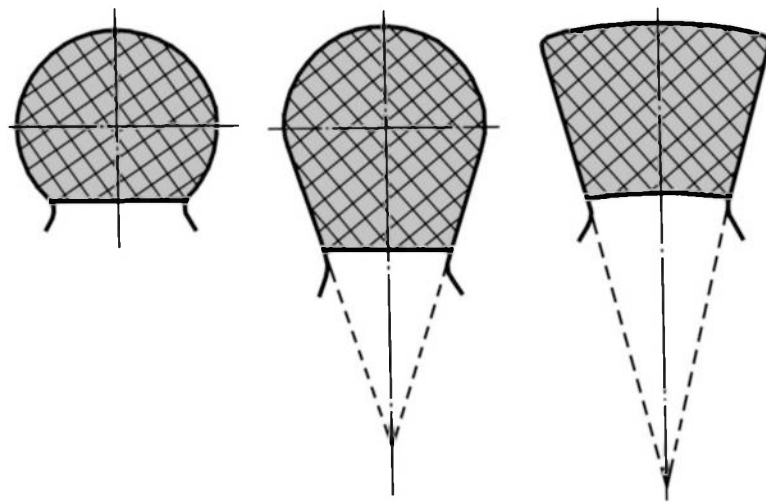


Рисунок 1.3 – Кільцевий тип відводу

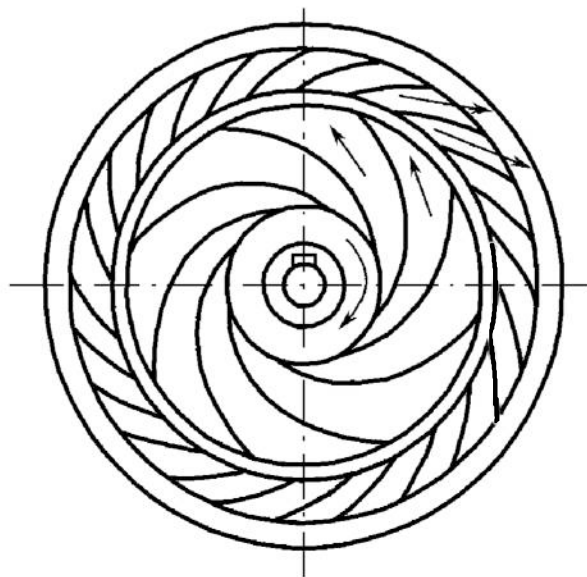


Рисунок 1.4 – Лопатковий тип відводу

1.6 Привод насосної установки

Основними критеріями вибору регульованого електроприводу конкретної установки є забезпечення оптимальних технологічних процесів та енергоефективність прийнятих технічних рішень. На вибір системи регульованого електроприводу впливають різні фактори: тип встановлених насосів і електродвигунів, число насосних агрегатів і їх потужність, умови експлуатації, співвідношення вартості обладнання і електроенергії. Різний підхід до вибору регульованого електроприводу для діючих, реконструйованих, знову проєктованих об'єктів, до складу яких входять насосні агрегати. Внаслідок цього не існує якогось одного виду регульованого електроприводу, який повинен застосовуватися у всіх насосних установках при будь-яких умовах експлуатації.

Застосування регульованого електроприводу доцільно, коли:

1. насосна установка подає рідину безпосередньо в мережу (насосні станції II і III підйомів, станції підкачки і т.п.);
2. діапазон коливання водоспоживання або припливу досить великий і становить не менше 15-20% максимальної подачі;
3. динамічна складова водоподачі досить велика і складає не менше 20-30% загальної висоти підйому рідини;
4. технологічні особливості вимагають подачу рідини в певному обсязі, при якому забезпечується необхідна якість продукції.

Застосування регульованого електроприводу зазвичай економічно доцільно при потужності насосних агрегатів 55-75 кВт і вище.

Для агрегатів потужністю 55-320 кВт, оснащених низьковольтними асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором, найбільш доцільне застосування частотно-регульованого електроприводу з низьковольтними перетворювачами частоти.

Для насосних агрегатів потужністю 250-1600 кВт, оснащених низьковольтними і високовольтними асинхронними електродвигунами з фазним ротором, слід застосовувати електропривод за схемою АВК. При цьому необхідно передбачити технічні рішення, що забезпечують роботу електроприводу з досить високим значенням коефіцієнта потужності.

Для агрегатів потужністю 1600-6000 кВт, оснащених асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором і синхронними високовольтними електродвигунами, найбільш доцільне застосування бестрансформаторного частотнорегульованого електропривода або по системі вентильного двигуна.

Для агрегатів потужністю 400-1600 кВт, оснащених високовольтними асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором, застосовуються двотрансформаторні частотно-регульовані електроприводи. Хоча це рішення досить громіздко через застосування двох трансформаторів, існують умови, в яких застосування цього виду електроприводу ефективно.

Наведені рекомендації носять загальний характер і справедливі при існуючому співвідношенні цін на електроенергію і перетворювальну техніку, а також при діючих нормах амортизації (8-10%) і терміні окупності, зазвичай до трьох років. Звідси випливає висновок, що вибір системи регульованого електроприводу повинен робитися не з загальних міркувань, а на основі техніко-економічних розрахунків і порівняння порівнянних варіантів.

Крім перерахованих вище технічних рішень часто доводиться вирішувати питання про кількість регульованих електроприводів для багатоагрегатного насосних установок, що працюють паралельно на один колектор. Регульованим електроприводом рекомендується обладнати два-три насосних агрегату, якщо на станції встановлено чотири-шість агрегатів, і три-чотири, якщо на станції встановлено сім-вісім насосних агрегатів. Для орієнтовної оцінки слід вважати, що 1 / 3-1 / 2 частина встановлених на станції агрегатів необхідно обладнати регульованим електроприводом. Для точної оцінки слід врахувати необхідну глибину регулювання частоти обертання насосного агрегату з регульованим електроприводом, що працює паралельно в складі інших агрегатів з

нерегульованим електроприводом. Глибина регулювання визначається максимальним коефіцієнтом нерівномірності і обмежується статичним напором і властивостями робочої характеристики насоса, так як вони визначають неробочу зону насоса. Неробоча зона характеризується холостий гілкою механічної характеристики насоса, при якій насос працює з низькою подачею і ККД, близькою до нуля.

При установці регульованих і нерегульованих насосних агрегатів, що працюють паралельно, система управління повинна передбачати не тільки зміна частоти обертання регульованих насосів, але і зміна числа працюючих нерегульованих агрегатів. При цьому включення або відключення нерегульованих агрегатів повинно здійснюватися завчасно, до того як подача регульованого насоса зменшиться до величини, що відповідає входженню в неробочу зону.

1.7 Регулювання електроприводом насоса

1.7.1 Регульований електропривод по схемі асинхронно-вентильного каскада

Дана схема електричного приводу належить до категорії регульованих електроприводів, оскільки ланцюг ротора містить реакцію ЕРС, це може змінити ковзання асинхронного двигуна.

Серед приводів змінного струму для насосів та вентиляторів найбільш економічним і відносно простим є асинхронно-вентильний каскад (АВК), який можна використовувати для отримання механічних характеристик з одним квадрантом. Електричний привід системи міститься в ланцюзі ротора асинхронного двигуна з фазним ротором, а некерований випрямляч на діоді зібраний відповідно до трифазної схеми мостового типу. Випрямний обертовий ланцюг постійного струму включає в себе силовий приводний інвертор на

тиристорі, який зібраний за допомогою трифазної мостової схеми. Оскільки електропривод за схемою АВК є дуже економічним, інвертор, що управляється мережею, дозволяє виробляти енергію ковзання в електромережі. Відповідний (клапанний) трансформатор використовується для узгодження ЕРС інвертора з напругою живлення. Сумарний ККД трансформатора та інвертора складає 0,96-0,97. Постійна часу інвертора становить приблизно 0,01 секунди. Принципову електричну схему електроприводу за схемою АВК приведено на рис. 1.5.

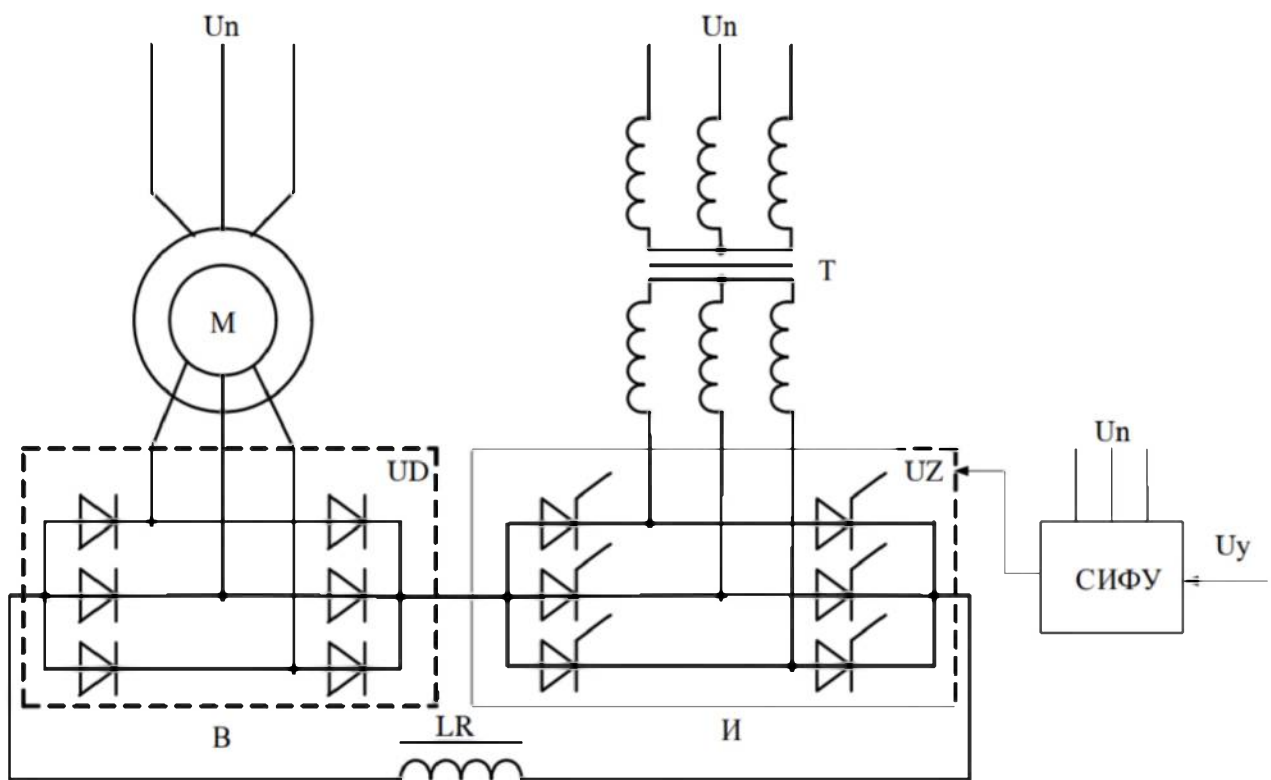


Рисунок 1.5 – Регульований електропривод за схемою асинхронно-вентильного каскаду

Змінюючи значення проти-ЕРС з нуля на номінальну напругу ротора, частота обертання двигуна регулюється в межах повного діапазону номінального значення до нуля. З цієї причини номінальні значення ЕРС і ротора повинні бути однаковими. Отже, для отримання повного діапазону управління, потужність інвертора повинна подаватися до номінальної потужності двигуна. Для цього потрібно використовувати дуже складні та потужні тиристорні перетворювачі.

Однак більшість систем мають відносно невеликий діапазон вимог до регулювання швидкості для відцентрових насосів та вентиляторів, що становить 20-30%. Для цього типу систем рекомендується регулювати частоту обертання в межах необхідного діапазону для реалізації схеми АВК та використовувати пусковий резистор для регулювання прискорення ротора в робочому діапазоні для регулювання. Коли ротор досягає необхідної швидкості, а його напруга нижче номінальної реакції електрорушійної сили інвертора, контактор станції управління закриває пусковий опір і підключає інвертор до ланцюга ротора двигуна. Потім відрегулюйте, змінивши реакцію ЕРС, що генерується інвертором.

Електропривод за схемою АВК має безліч характеристик, що визначають його доцільність для насосів та вентиляторів:

- у каскаді вся потужність, що подається на насос або вентилятор, не перетворюється, а лише перетворюється на відновлену потужність ковзання. Для цього обладнання вона не перевищує 20% від номінальної потужності агрегату;
- потужність АВК перетворювача (випрямляча та інвертора, що керується мережею) залежить від глибини регулювання швидкості. Обмежений діапазон регулювання швидкості насосів та вентиляторів дозволяє використовувати перетворювачі з меншою потужністю;
- залежність крутного моменту в турбомашинах від частоти обертання дає можливість здійснювати резисторний пуск за більш простою схемою в одну або дві ступені.

Істотний недолік електроприводу виконаного за АВК – його некомплектність і мале значення коефіцієнт потужності.

1.7.2 Частотно-керований електропривод

Найекономічнішим та найефективнішим є регулювання частоти обертання асинхронних та синхронних двигунів шляхом зміни частоти напруги джерела живлення. Використовуючи регулювання частоти обертання зі змінною частотою, швидкість ковзання асинхронного двигуна залишається малою незалежно від діапазону управління, а втрати двигуна невеликі. Електроприводи частотного керування не поступаються місцем постійним струмам за статичними та динамічними характеристиками. Якщо врахувати, що асинхронні двигуни з короткозамкненими роторами в 1,5-2 рази легші і в 3 рази дешевші за аналогічні двигуни постійного струму, то очевидна висока ефективність асинхронного електроприводу з регулюванням частоти.[4]

При роботі перетворювача частоти на асинхронних та синхронних двигунах, крім регулювання частоти, необхідно також регулювати напругу в обмотках кола. Це пов'язано з тим, що при зміні частоти магнітний потік двигуна зміниться обернено пропорційно частоті потужності. Тому, коли частота опускається нижче номінального струму, струм буде збільшуватися, що змушує муздраттеатр насичуватися, а струм намагнічування різко зростати. Збільшення частоти при постійній напрузі призведе до недостатнього використання двигуна.

Академіком М.П. Костенко був сформульований закон частотного регулювання: «Якщо сконструювати асинхронний двигун для частоти / n , моменту M_i і напруги на затискачах і n і змінювати потім при частоті / i моменті M напруга і таким чином, щоб завжди було задоволено співвідношення

то двигун буде працювати при практично незмінному коефіцієнті стійкості, незмінному коефіцієнті потужності, постійному абсолютному ковзанні і коефіцієнті корисної дії, що залежить тільки від зміни частоти і не залежить від зміни моменту на валу, якщо насичення магнітної системи не надто велике ».

Правила регулювання асинхронних і синхронних електродвигунів при зміні частоти струму живлення приведені в табл. 1.1.

Натепер використовуються перетворювачі частоти тиристорного і транзисторного улаштування, вони знайшли застосування в керованих електроприводах з асинхронними та синхронними двигунами, що діляться на три групи:

- безпосередні (БПЧ);
- дволанковий з автономним інвертором напруги (ПЧ з АІН);
- дволанковий з автономним інвертором струму (ПЧ з АІС).

Таблиця 1.1 – Закони частотного керування

Закон	M / M_n	U / U_n	P / P_n	Φ / Φ_n	I / I_n
Стала потужність $M = M_n \left(f_n / f \right)$	f / f_n	$\sqrt{f / f_n}$	const	$\sqrt{f / f_n}$	$\sqrt{f / f_n}$
Сталий момент $M = M_n = const$	const	f / f_n	f / f_n	const	const
Вентиляторний закон $M = M_n \left(f_n / f \right)^2$	$\left(f / f_n \right)^2$	$\left(f / f_n \right)^2$	$\left(f / f_n \right)^3$	f / f_n	f / f_n

Дволанковий перетворювач частоти включають в себе проміжний контур постійної напруги або струму.

Водяні насоси та вентилятори малої та середньої потужності приводяться в дію асинхронними потужними синхронними електроприводами змінної частоти. Розвиток напівпровідникової техніки та мікроелектроніки дозволив електротехнічній промисловості створити перетворювачі частоти з регулюванням якості для асинхронних та синхронних електроприводів (системи ПЧ-АД та ПЧ-СВ та ПВ-Д загалом), які не поступаються електроприводам постійного струму. . Сучасна система регулювання частоти обертання зі змінною

частотою має високі енергетичні характеристики та широкий діапазон управління, який можна використовувати разом з різними структурами управління.

Найпоширенішим є перетворювач частоти з ланкою постійного струму (двоканальний перетворювач частоти), який містить керований або некерований випрямляч (перша ланка) та незалежний інвертор (друга). У випадку використання керованого випрямляча як першої ланки пристрій виконує функцію генерації вихідної напруги проміжної частоти або функцію захисту. Якщо використовується неконтрольований випрямляч, функція генерації вихідної напруги покладається на окремий інвертор. Крім того, автономний інвертор генерує вихідну частоту інвертора у випадку керованих і некерованих випрямлячів. Регулювання напруги та частоти в перетворювачі частоти створює можливість формування різних законів регулювання частоти.

Існує два типи інверторів з ланцюгами постійного струму: з автономним інвертором струму (AIC) та автономним інвертором напруги (AIN). Перетворювачі частоти на базі автономних інверторів струму (рис. 1.6) містять керований випрямляч і інвертор, виконаний на замикаються тиристорах типу СТО, за рахунок чого домагаються високого коефіцієнта потужності, який практично дорівнює одиниці. Найбільш часто перетворювачі частоти з автономним інвертором струму використовують для високовольтних синхронних електроприводів насосних установок, як це показано на рис. 1.6. Основними перевагами ПЧ-АД з АІС є: Можливість рекуперації енергії в мережі; близька до синусоїдальної вихідної напруги; безпека режиму короткого замикання на виході. До недоліків належать: обмежена вихідна частота регулювання верхньої межі (зазвичай, 70 Гц); комутаційні перенапруги на тиристорах АІС, які зростають зі збільшенням частоти.

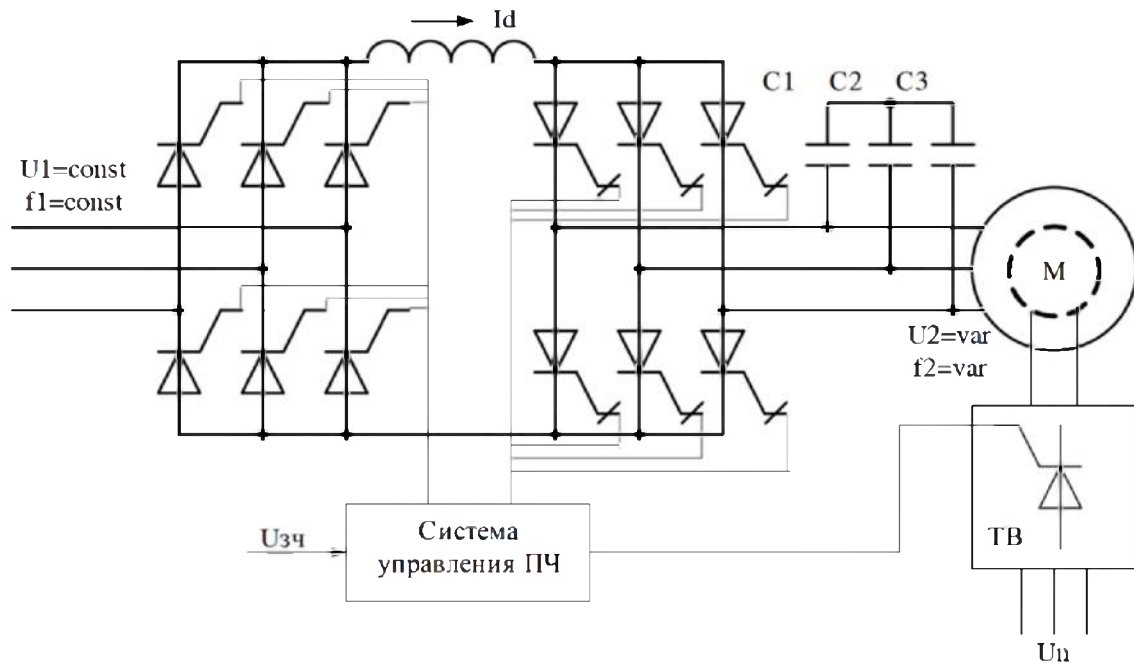


Рисунок 1.6 – Частотно-керований синхронний електропривод з перетворювачем частоти на базі автономного інвертора струму

Перетворювачі частоти з автономним інвертором напруги (рис. 1.7) містять некерований випрямляч і інвертор, виконаний на силових польових транзисторах модульного виконання типу IGBT. Транзисторний варіант дозволяє формувати синусоїдальну напругу змінної частоти на обмотках статора асинхронного двигуна за рахунок широтно-імпульсної модуляції. Основні переваги ПЧ-Д з АІН: практично синусоїдальний струм навантаження; широкий діапазон вихідних частот від 0 до 1000 Гц; можливість підключення до одного перетворювача частоти кілька електродвигунів. Недоліком є неможливість отримання генераторного режиму з віддачею енергії в мережу через наявність некерованого випрямляча, який має односторонню провідність.

Описані властивості схем дволанцюгових ПЧ визначають області їх використання. ПЧ-Д з автономним інвертором струму застосовують в високодинамічних індивідуальних електроприводах, а ПЧ-Д з автономним інвертором напруги застосовують в групових та індивідуальних електроприводах зі спокійними динамічними процесами.

Сумарний ККД випрямляча і автономного інвертора становить 0,95-0,96.
Постійна часу близько 0,005 секунди.

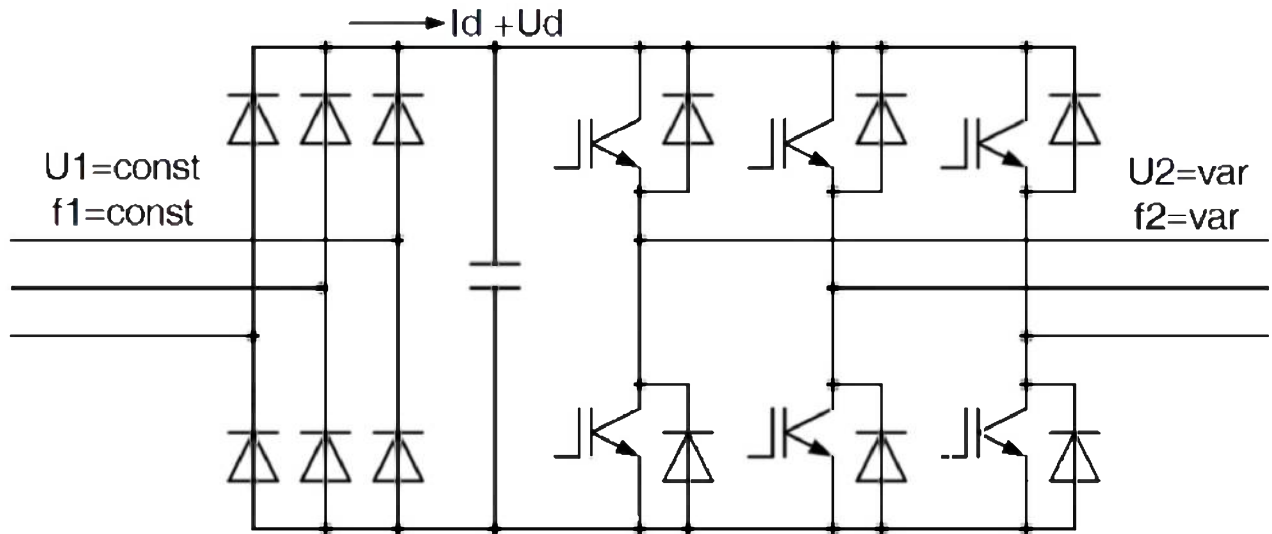


Рисунок 1.7 – Принципова електрична схема перетворювача частоти з автономним інвертором напруги

Для насосів та вентиляторних пристроїв через відсутність високовольтних транзисторів у модульній версії типу IGBT перетворювачі частоти з незалежними інверторами струму використовуються лише для високовольтних електроприводів, і на цій основі незалежні інвертори напруги.

Найпоширенішою установкою насоса та вентилятора є низьковольтний інвертор з автономним інвертором напруги, який дозволяє сформувати будь-який закон регулювання частоти згідно з табл. 1.1. Також дозволяється підключати до перетворювача, що відповідає джерелу живлення, декільком насосам або вентиляторам.

Варіантом використання перетворювача частоти з перетворювачем напруги в високовольтному асинхронному електроприводі з коротким замиканням ротора є схема двотрансформаторного високовольтного частотно-модульованого електроприводу, як показано на рисунку 1. 2.3 Перетворювальна частина пристрою виконана з низьковольтних напівпровідникових компонентів. Напруга від основного джерела живлення до перетворювача 112 забезпечується

через понижуючий трансформатор Т1. Вихідна напруга після перетворення частоти подається на високовольтний асинхронний двигун М через підсилюючий трансформатор Т2. Основним елементом ланцюга подвійного трансформатора є синусоїдний фільтр (синусоїдний фільтр), який міститься між перетворювальною частиною та підвищувальним трансформатором.[5]

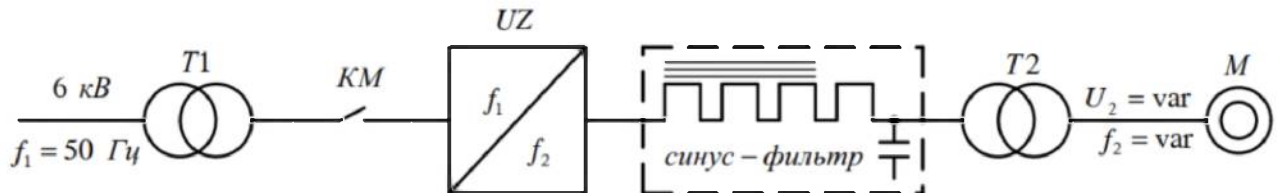


Рисунок 1.8 – Схема двохтрансформаторного високовольтного частотно-регульованого асинхронного електроприводу

Менше поширення в електроприводах насосних і вентиляторних установок отримала система з безпосереднім перетворювачем частоти (БПЧ). Трифазна система електроприводу з БПЧ містить три реверсивних тиристорних перетворювача постійного струму, управління якими здійснюється модулюючим напругою. Частота і амплітуда цієї напруги визначає частоту і напругу на виході БПЧ. За допомогою реверсивного тиристорного перетворювача формуються позитивний напівперіод вихідного напруги (режим «вперед») і негативний напівперіод вихідного напруги (режим «назад»). На рис. 2.4 показана схема найпростішого БПЧ, в якому тиристорні перетворювачі постійної напруги в кожній фазі (+ А, - А; + В, - В; + С, - С) виконані за трифазною нульовою схемою.

Основні переваги БПЧ: природна комутація струму мережевим змінним напругою, завдяки чому використовуються прості одноопераційних тиристори; повна оборотність схеми; мінімальна кількість вентилів, одночасно включених між мережею і двигуном. Основний недолік БПЧ - погіршення форми вихідної напруги при збільшенні частоти. Для схеми, представленої на рис. 2.4, максимальну вихідну частоту обмежують зазвичай частотою 12,5 Гц. Перехід від

1.7.3 Регулювальні властивості керованого електроприводу

Насоси і вентилятори мають механічну характеристику, описується рівнянням квадратичної параболи. Тому, відповідно до закону частотного регулювання М.П. Костенко (табл. 1.1), частотно-регульований електропривод повинен регулюватися по вентиляторні закону відповідно до співвідношення

$$\frac{U}{f^2} = \text{const} \quad \frac{E}{f^2} = \text{const} \quad (1)$$

де U – напруга обмотки статорного ланцюга; f – частота струму в обмотки ланцюга; E – ЕРС обмотки статорного ланцюга.

Цей закон частотного регулювання можливий для реалізації в перетворювачах частоти з автономним інвертором напруги.

Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при вентиляторному законі частотного регулювання мають вигляд, представлений на рис. 1.10.

На рис. 1.10 представлена також механічна характеристика турбомашини, а сімейство механічних характеристик асинхронного електродвигуна при різних частотах струму статора представлена у вигляді робочої частини характеристик. Моменти і кутові швидкості електроприводу визначаються робочими точками на перетині механічних характеристик електродвигуна і турбомашини.

При роботі на частотах 0-50 Гц застосовується закон частотного регулювання відповідно до . При роботі на частотах понад 50 Гц необхідно використовувати інший закон частотного регулювання. Це пов'язано з тим, що приводний електродвигун має обмежену потужність, яка визначається його номінальною величиною. Реалізація підвищених значень кутової швидкості і електромагнітного моменту в міру збільшення частоти струму в обмотки ланцюга стає неможливою, тому необхідно на частотах понад 50 Гц обмежувати момент. Це стає можливим при законі частотного регулювання з постійним

значенням потужності ($P = \text{const}$). Цей закон частотного регулювання реалізується системою управління перетворювача частоти з автономним інвертором напруги і струму шляхом ослаблення магнітного поля двигуна. Так як максимальний момент асинхронного електродвигуна зменшується в міру зростання частоти (понад 50 Гц), то настає межа регулювання по кутовій швидкості, як це показано на рис. 1.10. Верхнє обмеження кутової швидкості визначає граничний діапазон регулювання по швидкості і залежить від механічної характеристики турбомашини. Однак більшість насосів і вентиляторів працюють з кутової швидкістю, менше ніж його номінальне значення, тому обмеження верхньої межі з регулювання швидкості не є перешкодою для використання в цих установках частотно-регульованого електроприводу.

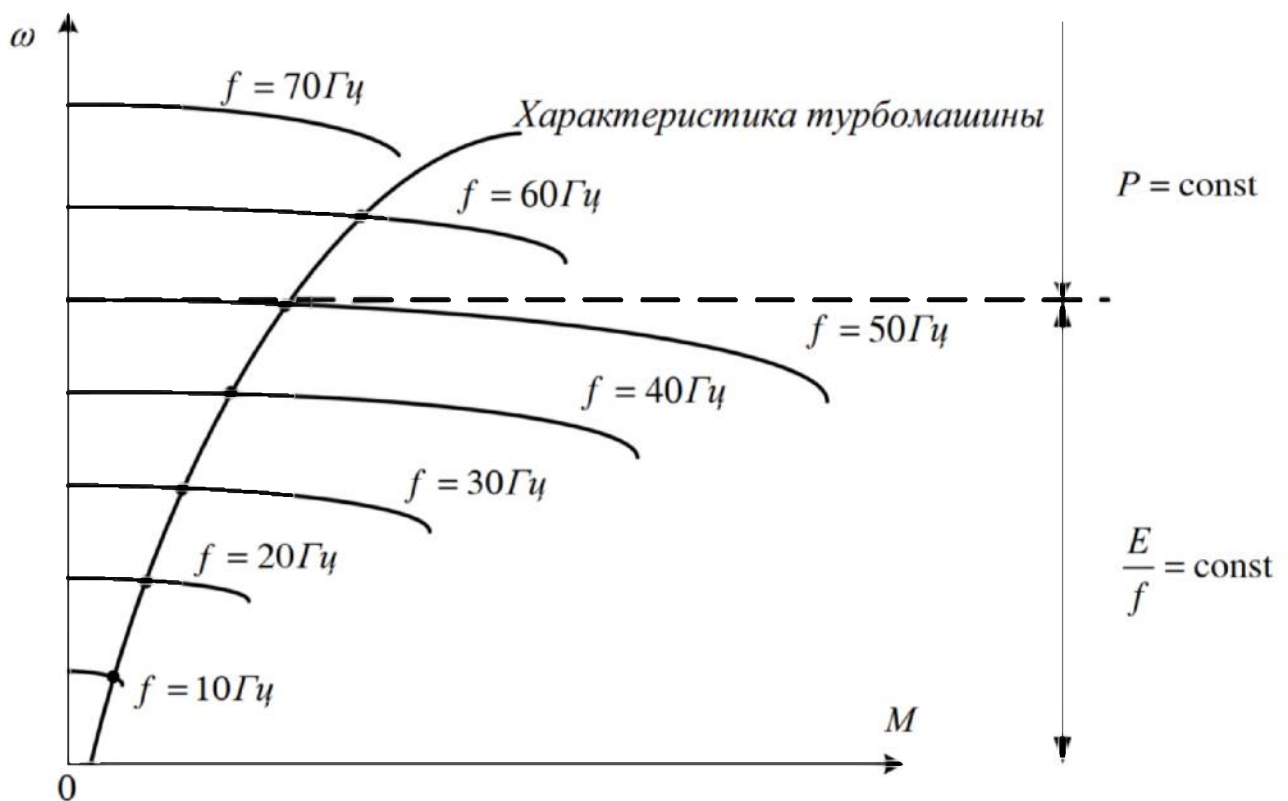


Рисунок 1.10 – Механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу за схемою ПЧ-АД з АІН і турбомашини

У перетворювачах частоти з автономним інвертором струму неможливо реалізувати закон частотного регулювання для частот до 50 Гц. В силу фізичних особливостей комутації струму силовими напівпровідниковими приладами в АІС для таких перетворювачів частоти реалізуємо закон частотного регулювання з постійністю магнітного потоку $\Phi = const$ (табл. 1.1). У сучасній теорії силових перетворювальних пристроїв цей закон називається законом частотного регулювання з постійністю результуючого вектора потокозчеплення ротора $\Psi_r = const$. При реалізації такого закону частотного регулювання зберігається сталість максимального моменту на всьому діапазоні зміни частоти до 50 Гц. На частотах понад 50 Гц реалізується закон збереження сталості потужності $P = const$ за рахунок ослаблення магнітного потоку асинхронної машини таким же чином як і в перетворювачах частоти з автономним інвертором напруги. Механічні характеристики (робоча гілка) асинхронного електродвигуна при законі частотного регулювання $\Psi_r = const$ мають вигляд, представлений на рис. 1.11. Тут же представлена механічна характеристика турбомашини. Особливістю застосування частотно-регульованого електроприводу за схемою ПЧ-АД з АІС є велика перевантажувальна здатність електродвигуна на малих частотах, що є зайвим для насосних і вентиляторних установок. Однак часто в високовольтних електроприводах, особливо великої потужності, інші варіанти, крім як пов'язані із застосуванням ПЧ-Д з АІС, відсутні.

Особливістю електромеханічних властивостей асинхронно-вентильного каскаду є можливість роботи на частотах обертання електродвигуна нижче основної швидкості. Для більшості насосних і вентиляторних установок не потрібно регулювання частоти обертання робочого колеса вище номінальної швидкості, тому АВК є для цих установок, якщо вони обладнані асинхронним електродвигуном з фазним ротором, найбільш доцільною системою електроприводу. Це пов'язано з тим, що АВК за вартісними параметрами є найдешевшою системою електроприводу в порівнянні з високовольтними частотно-регульованими електроприводами, включаючи вентильний двигун, а

по регулювальним властивостям не поступається цим системам. Іншою особливістю електромеханічних властивостей АВК є знижене значення перевантажувальної здатності електроприводу при регулюванні ковзання. Максимальний момент на штучних механічних характеристиках менше приблизно на 17% в порівнянні з природною механічною характеристикою. Крім цього необхідно відзначити, що в системі АВК механічні характеристики є більш м'якими порівняно з природними механічними характеристиками. [6]

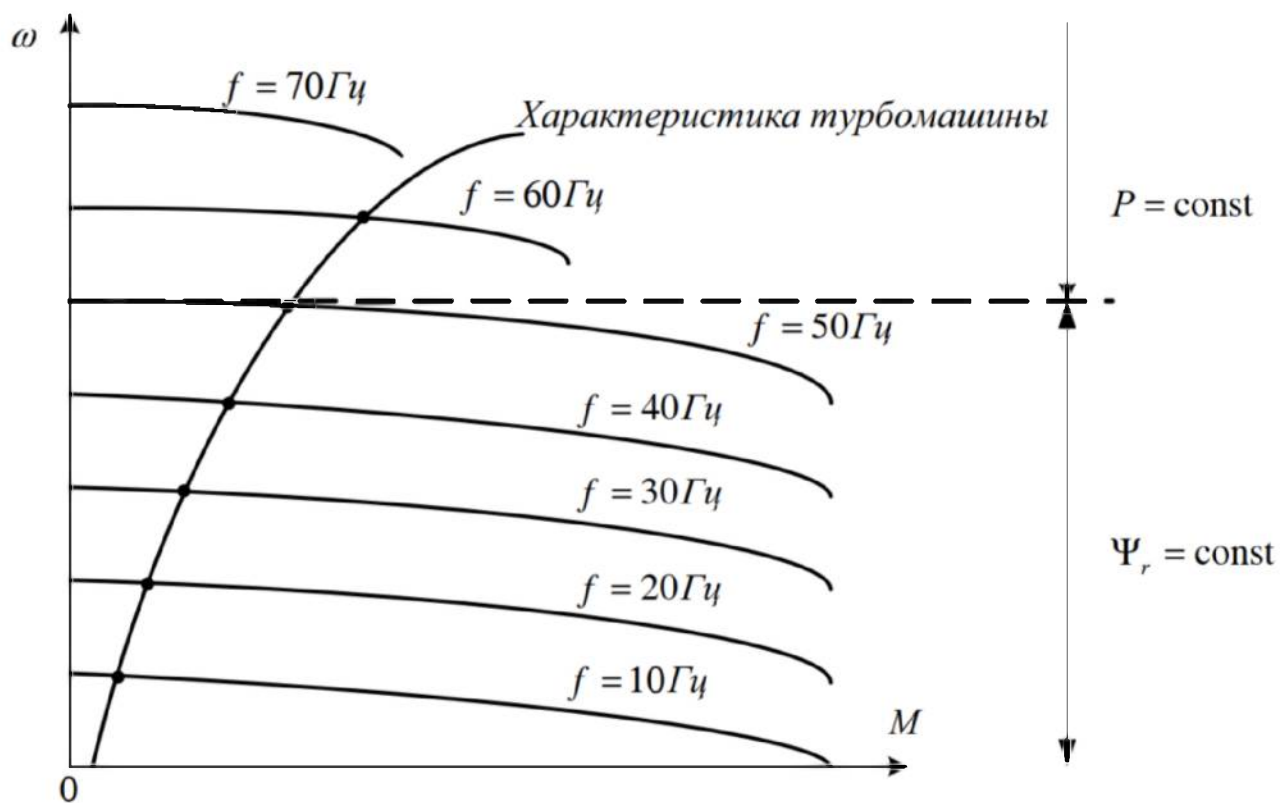


Рисунок 1.11 – Механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу за схемою ПЧ-АД з АІС і турбомашини

Це пов'язано з тим, що в роторну ланцюг асинхронного електродвигуна включено досить багато додаткових елементів, що володіють активним опором, і які впливають на жорсткість механічних характеристик (елементи випрямляча і інвертора, узгоджувальний трансформатор, що згладжує дросель, дроти сполучних ланцюгів). Механічні характеристики електроприводу за схемою АВК і турбомашини представлені на рис. 2.11, де - кут випередження інвертора.

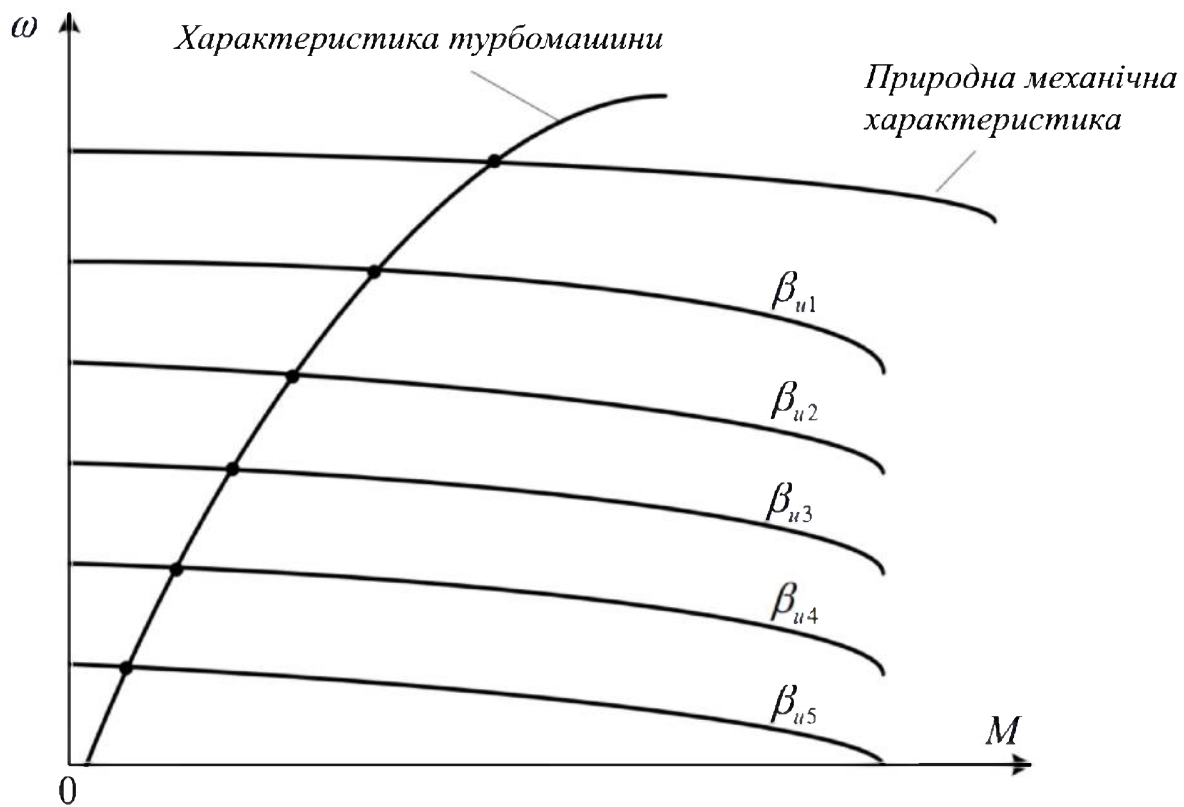


Рисунок 1.12 – Механічні характеристики електроприводу за схемою АВК і турбомашини

Недоліками системи АВК є некомплектність поставки елементів електроприводу, знижений коефіцієнт потужності. При проектуванні слід звернути увагу, що не можна використовувати систему АВК для насосів і вентиляторів вертикального розташування, так як електротехнічна промисловість не випускає асинхронні електродвигуни з фазним ротором в вертикальному виконанні.

2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Розрахунок та вибір двигуна

Для розрахунку системи та розробки системи керування маємо параметри насоса приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри насоса

Продуктивність, м³/год	Напір, м	Швидкість обертання вала, об/хв	ККД	Щільність рідини, кг/м³
125	20	1500	0,8	1000

Знайдемо потужність, що споживається насосом:

$$P = K_z \cdot \frac{g \cdot Q \cdot H \cdot \rho}{\eta_n \cdot 3600} = 1,2 \frac{9,81 \cdot 125 \cdot 20 \cdot 1000}{0,8 \cdot 3600} = 10,2 \text{ кВт}$$

де K_z – коефіцієнт запасу.

Обираємо в якості приводного двигуна WEG W22 160M. Із параметрами наведеними в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри обраного двигуна

Модель двигуна	P _н , кВт	Параметри при номінальному навантаженні			$\frac{M_{\max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	J, кг·м²
		n _н , об/хв	η, %	cos φ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Синхронна частота обертання 1500 об/хв								
WEG W22 160M	11	1460	91	0,89	2,5	2,1	6	0.09062

2.2 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

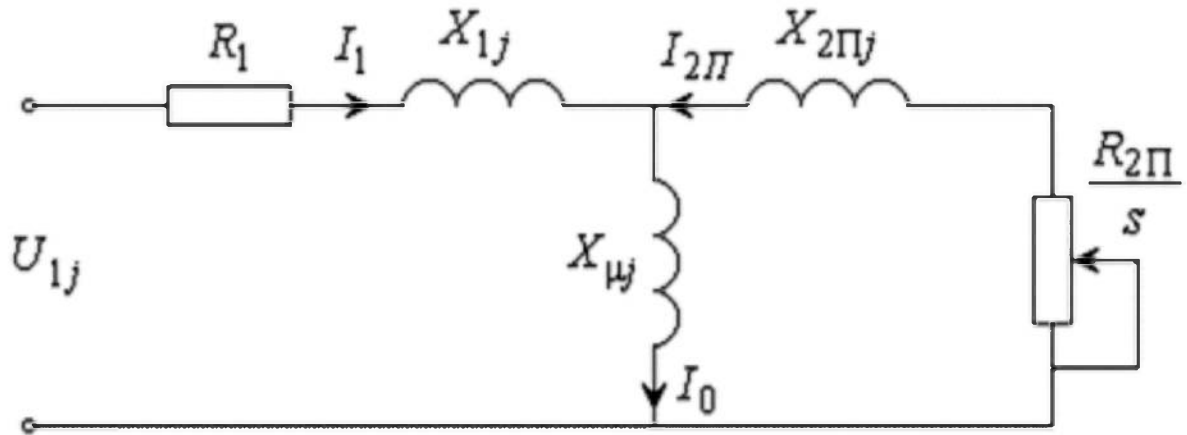


Рисунок 2.1 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна

Знайдемо струм холостого ходу АД:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_* I_{1n} (1 - s_n)}{1 - p_* s_n} \right]^2}{1 - \left[\frac{p_* (1 - s_n)}{1 - p_* s_n} \right]^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{52,4^2 - \left[\frac{0,75 \cdot 69,2 (1 - 0,02)}{1 - 0,75 \cdot 0,02} \right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,02)}{1 - 0,75 \cdot 0,02} \right]^2}} = 13,6 \text{ A}$$

де I_{1n} – номінальний струм двигуна;

I_{11} – струм двигуна при частковому завантаженні.

Критичне ковзання:

$$s_k = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0.02 \frac{2 + \sqrt{2^2 - [1 - s \cdot 0.02 \cdot 1 \cdot (2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.02 \cdot 1 \cdot (2 - 1)} = 0.078;$$

де $k_{\max}$ – перевантажувальна здатність.

$$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R'_2)$$

Тоді

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{13,6}{2 \cdot 6,5 \cdot 69,2} = 1.015.$$

Знаходимо коефіцієнт:

$$A_1 = m U_{1\Phi}^2 (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{MAX} \cdot P_H) = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0.02)}{2 \cdot 1.015 \cdot 2 \cdot 37 \cdot 10^3} = 0,947.$$

У такому випадку активний опір ротора, приведений обмотки статора:

$$R'_2 = A_1 / (\beta + 1 / s_k) \cdot C_1 = \frac{0,947}{\left(1 + \frac{1}{0.078}\right) \cdot 1.015} = 0.068 \text{ Ом}.$$

Індуктивність розсіяння обмотки ротора

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2\pi f_{1H}} = \frac{0.5}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.001592 \text{ Гн}.$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,015 \cdot 0,068 \cdot 1 = 0,069 \text{ Ом.}$$

Індуктивність розсіяння обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f_{1H}} = \frac{0.368}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.00117 \text{ Гн.}$$

Знаходимо параметр, що дозволяє обчислити опір індуктивний КЗ:

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.078^2}\right) - 1^2} = 12,78.$$

Тепер можна знайти індуктивний опір КЗ:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 12,78 \cdot 1.015 \cdot 0.068 = 0,876 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір роторної обмотки приблизно вчислимо:

$$X_{2H}' = 0.58 \cdot X_{KH} / C_1 = 0.58 \cdot \frac{0,876}{1.015} = 0,5 \text{ Ом ,}$$

Аналогічно індуктивний опір обмотки статора:

$$X_{1H} = 0.42 \cdot X_{KH} = 0.42 \cdot 0,876 = 0,368 \text{ Ом}$$

За розрахованими змінними обчислимо критичне ковзання:

$$s_K = \frac{C_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1.015 \cdot 0.068}{\sqrt{0.069^2 + 0,876^2}} = 0.078.$$

ЕРС вітки намагнічування:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1j} \cdot \cos \phi_{1H} - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1j} \cdot \sin \phi_{1H} + X_{1H} \cdot I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0.89 - 0.069 \cdot 69.2)^2 + (220 \cdot 0.456 + 0,368 \cdot 69.2)^2} = 205,2 \text{ В} \end{aligned}$$

Тоді індуктивний опір намагнічування:

$$X_{\mu H} = E_1 / I_0 = \frac{205,2}{13.6} = 15,1 \text{ Ом}.$$

Результуюча індуктивність:

$$L_{\mu H} = \frac{X_{\mu H}}{2\pi f_{1H}} = \frac{15,1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.048 \text{ Гн}.$$

2.3 Побудова електромеханічних та механічних характеристик

Незважаючи на простоту фізичних явищ повний математичний опис процесів в асинхронної машині провести досить складно. Ця складність породжена кількома причинами:

- всі напруги, струми, потокозчеплення - змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами;

- взаємодіють рухомі контури, взаємне положення яких змінюється в просторі;

- магнітний потік нелінійно пов'язаний з намагнічуючим струмом (проявляється насичення магнітного кола), активні опори роторних ланцюгів залежать від частоти (проявляється ефект витіснення струму), опору всіх ланцюгів істотно залежать від температури і т.п.

Для розрахунку статичної механічної характеристики приймають такі припущення:

- ЕРС, струми, потокозчеплення - синусоїдальні в часі і просторі;
- провідність намагнічуючого контуру постійна (не враховується крива намагнічування);
- параметри ланцюгів постійні (активні опори й індуктивності не залежать від частоти, насичення не впливає на індуктивні опори розсіювання);
- не враховуємо моменти, створювані вищими гармоніками потоку і струму, розрахунок ведемо по першій гармоніці;
- гістерезис і вихрові струми відсутні;
- механічні втрати на тертя і вентиляцію відсутні (віднесені до статичного моменту).

Знаючи параметри схеми заміщення розрахуємо механічні та електромеханічні характеристики.

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_{\Pi}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад / с}.$$

Електромеханічну характеристику АД будується як залежність приведенного струму ротора від ковзання:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}},$$

Переймаючись чисельними показника ковзання можна провести розрахунок відповідного значення струму і застосувавши формулу $\omega = \omega_0 (1 - s)$ отримаємо відповідне значення кутової швидкості.[7]

Беремо до уваги, що характер струму намагнічування двигуна цілком реактивний, формула для електромеханічної характеристики, яка описує залежність струму статора від ковзання, матиме наведений нижче вигляд:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

Змінюючи ковзання виконаємо обчислення природних електромеханічних характеристик АД, які представлені на рисунку 2.2.

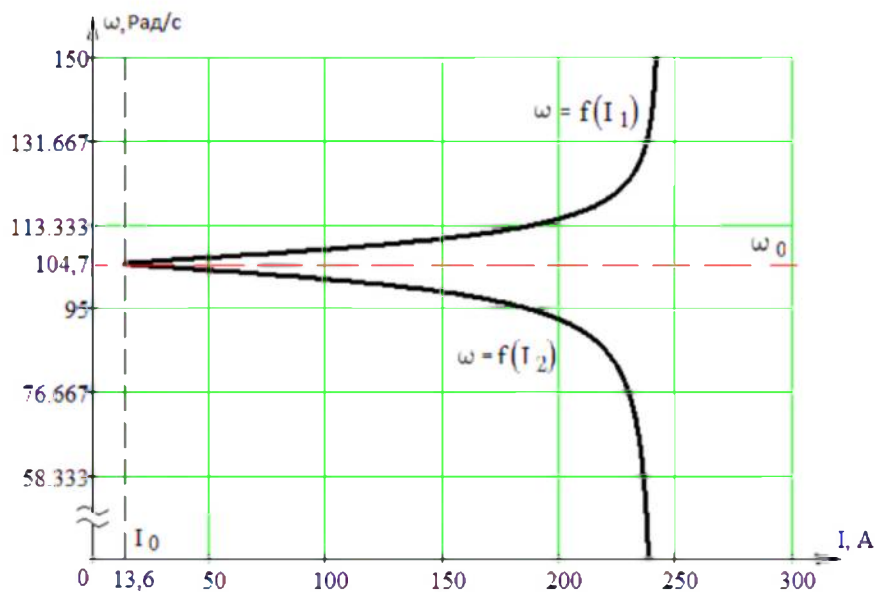


Рисунок 2.2 – Природні електромеханічні характеристики

Механічна характеристика АД розраховується за наведеною нижче формулою:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]}$$

Критичний момент:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2} \right]} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot 1,015 \cdot \left[0,069 + \sqrt{(0,069^2 + 0,876^2)} \right]} = 721,1 \text{ Нм},$$

Критичне ковзання:

$$s_K = \pm R_2' \sqrt{\frac{1 + \left(R_1 / X_{\mu H} \right)^2}{R_1^2 + X_{KH}^2}} = 0,068 \sqrt{\frac{1 + (0,069 / 15,08)^2}{0,069^2 + 0,876^2}} = 0,078.$$

Якщо момент більший нуля, то це означає, що двигун працює в руховому режимі, якщо менше нуля, то генераторному.

При цьому номінальні швидкість та момент:

$$\omega_H = \omega_0 \times (1 - s_H) = 104,72 \times (1 - 0,02) = 102,6$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{37 \cdot 10^3}{102,6} = 360,5 \text{ Нм}$$

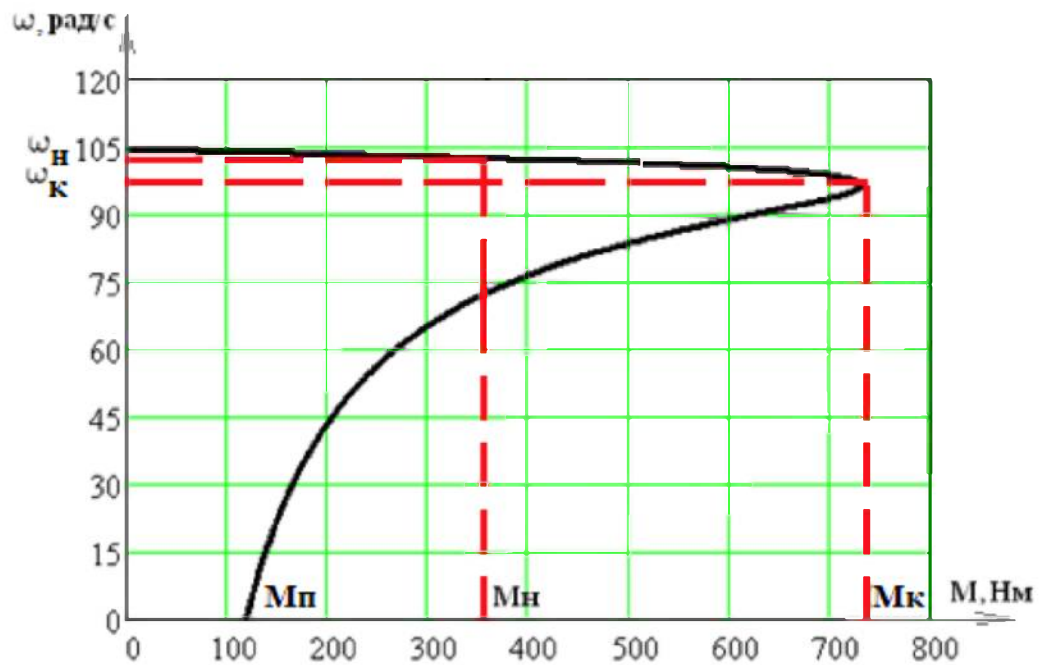


Рисунок 2.3 – Природна механічна характеристика АД

Розрахунок механічних характеристик виконаємо у відповідності до формули:

$$M = \frac{3U_{1j}^2 R_2'}{\omega_0 s \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]}.$$

При зниженні напруги фази U_{1j} синхронна кутова швидкість ω_0 і критичне ковзання s_k двигуна не змінюються, а критичний момент двигуна M_k знижується пропорційно до квадрату напруги фази. Відповідно до цього знижується жорсткість робочої області механічної характеристики.

Напруга змінюється відповідно до:

$$U_j = \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \cdot U_{1n},$$

де α – кут відкриття тиристорів.

Критичний момент:

$$M_{\kappa} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)}.$$

Визначимо критичний момент для кутів відкриття 30, 60, 90.

$\alpha = 30^\circ$:

$$U_0 = \frac{1 + \cos(30)}{2} \cdot 220 = 205,69 \text{ В};$$

$$M_{\kappa} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} = \frac{3 \cdot 205,69^2}{2 \cdot 104,7 \cdot \left(0,069 \pm \sqrt{(0,069^2 + 0,876^2)} \right)} = 639,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$\alpha = 60^\circ$:

$$U_0 = \frac{1 + \cos(60)}{2} \cdot 220 = 165 \text{ В};$$

$$M_{\kappa} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} = \frac{3 \cdot 165^2}{2 \cdot 104,7 \cdot \left(0,069 \pm \sqrt{(0,069^2 + 0,876^2)} \right)} = 411,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$\alpha = 90^\circ$:

$$U_0 = \frac{1 + \cos(90)}{2} \cdot 220 = 110 \text{ В};$$

$$M_{\kappa} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} = \frac{3 \cdot 110^2}{2 \cdot 104,7 \cdot \left(0,069 \pm \sqrt{(0,069^2 + 0,876^2)} \right)} = 183 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тоді змінюючи ковзання отримаємо механічні характеристики **на** **рисунку 2.4.**

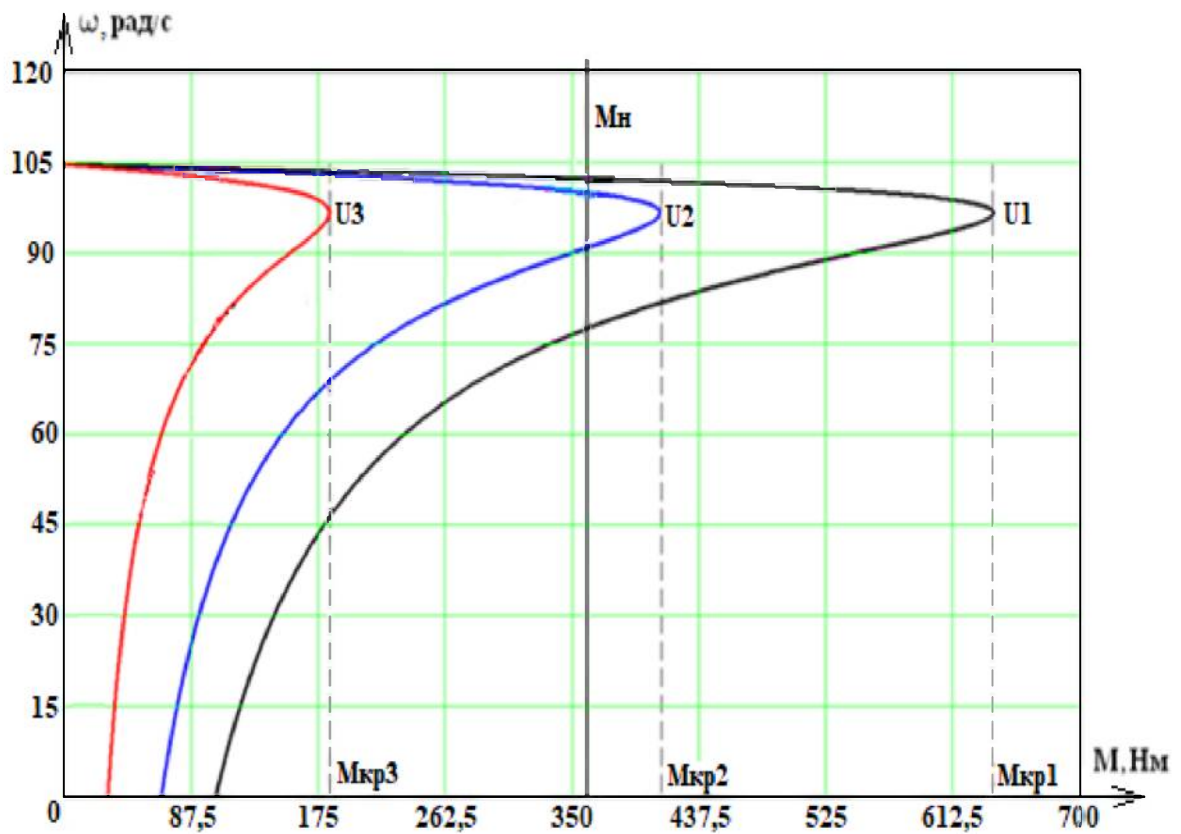


Рисунок 2.4 – Штучні механічні характеристики

Електромеханічну регулювальну характеристики будуємо у відповідності до формули:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(R_1 + R_2' / s\right)^2 + X_{KH}^2}}$$

Тоді змінюючи значення ковзання розрахуємо електромеханічні характеристики на рисунку 2.5.

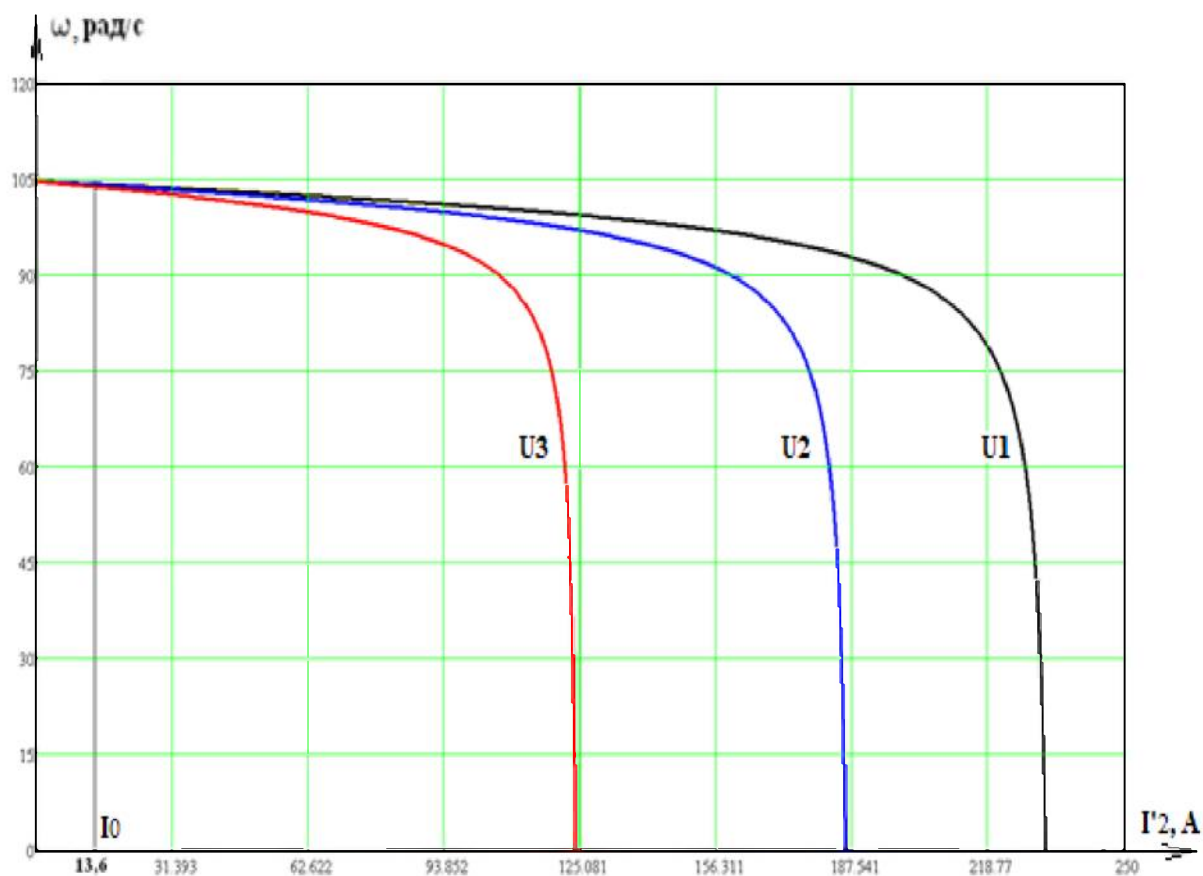


Рисунок 2.5 – Штучні електромеханічні характеристики відносно струму ротора

За виразом будуємо електромеханічні характеристики відносно струму статора:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)}$$

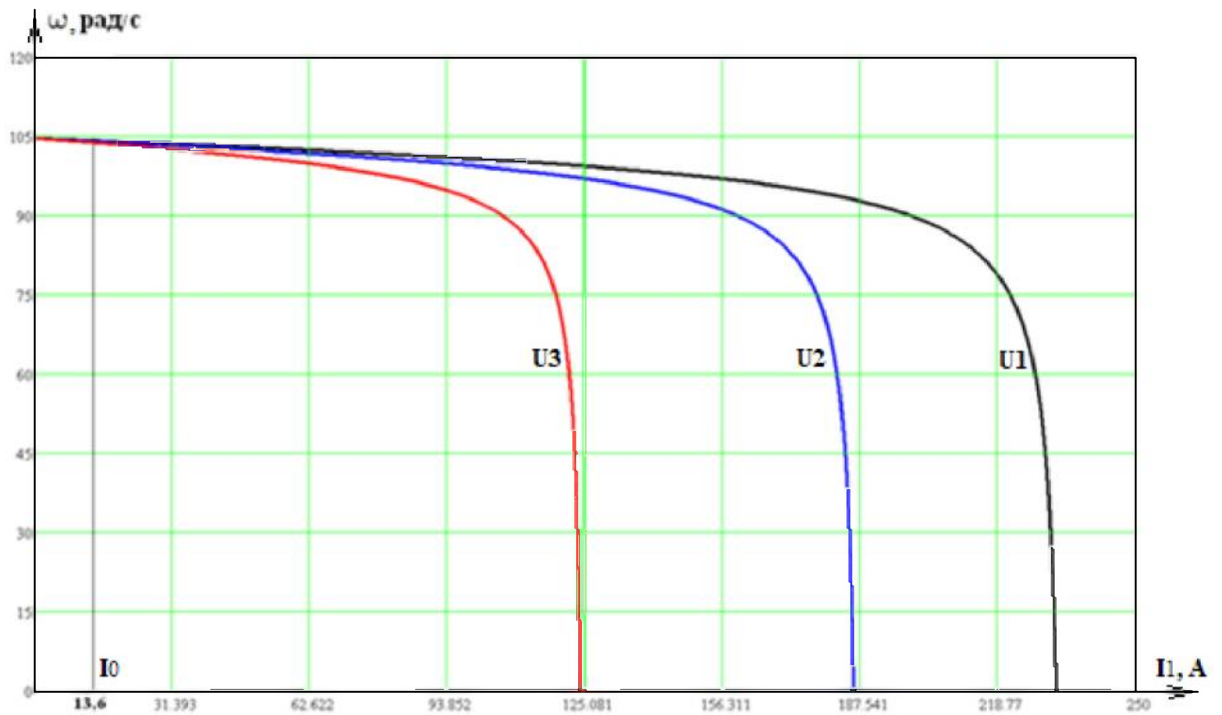


Рисунок 2.6 – Штучні електро механічні характеристики відносно струму статора

2.4 Розрахунок енергетичних показників електроприводу

Повна потужність втрат в номінальному режимі:

$$\Delta P_n = P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) = 37000 \cdot \left(\frac{1}{0,91} - 1 \right) = 3659 \text{ Вт}$$

Змінна складова втрат потужності:

$$\Delta P_{з.н.} = M_n (\omega_0 - \omega_n) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) = 360,5 \cdot (104,7 - 102,6) \cdot \left(1 + \frac{0,069}{0,068} \right) = 1540 \text{ Вт}.$$

Стала складова втрат потужності тоді:

$$\Delta P_{c.n.} = \Delta P_n - \Delta P_{з.н} = 3659 - 1540 = 2119 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт складової втрат потужності:

$$a = \frac{\Delta P_{c.n.}}{\Delta P_{з.н}} = \frac{2119}{1540} = 1,37.$$

3 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Синтез системи керування

Структурна схема частотно-керованого електроприводу насоса зі зворотнім зв'язком за тиском зі скалярною IR-компенсацією представлена на рисунку 3.1.

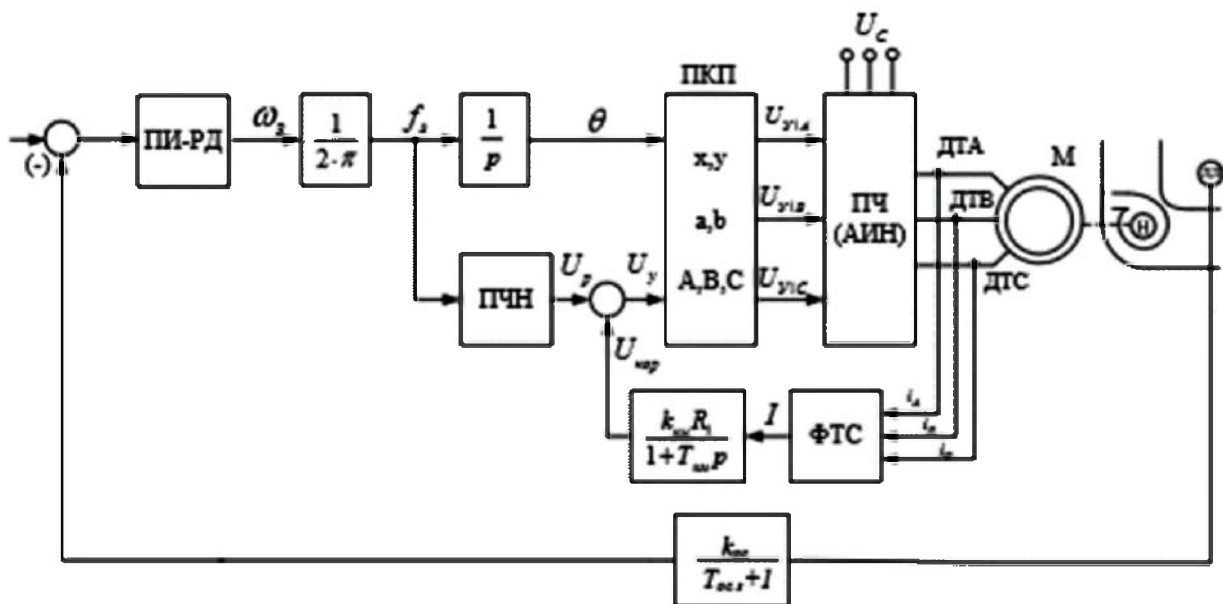


Рисунок 3.1 – Структурна схема частотно-керованого електроприводу зі зворотнім зв'язком за тиском

Контур регулювання тиску представлений на рисунку 3.2.

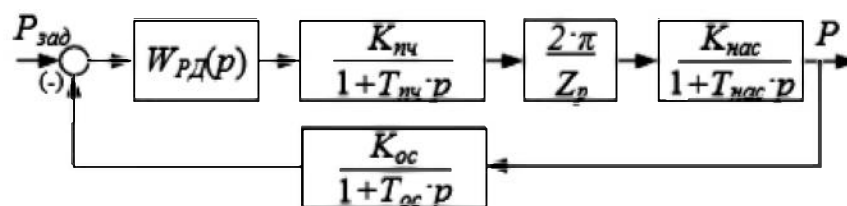


Рисунок 3.2 – Структурна схема контуру тиску

На рисунку прийняті наступні позначки:

$W_{p\partial}(p)$ – передатна функція регулятора тиску;

K_{nc} – коефіцієнт передачі перетворювача частоти (K_{nc});

$T_{nc} = \frac{1}{5000} = 0,2 \text{ мс}$ – стала часу запізнення автономного інвертора напруги

K_{nac} – коефіцієнт передачі насосу;

T_{nac} – стала часу запізнення насосу;

K_{oc} – коефіцієнт зворотного зв'язку;

T_{oc} – стала часу запізнення зворотного зв'язку.

3.1.1 Налаштування регулятора тиску на модульний оптимум

Розімкнутий контур тиску з ПІ-регулятором, налаштований на модульний оптимум має наступну передатну функцію:

$$W_{TO}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}$$

де T_{μ} – стала часу контуру тиску.

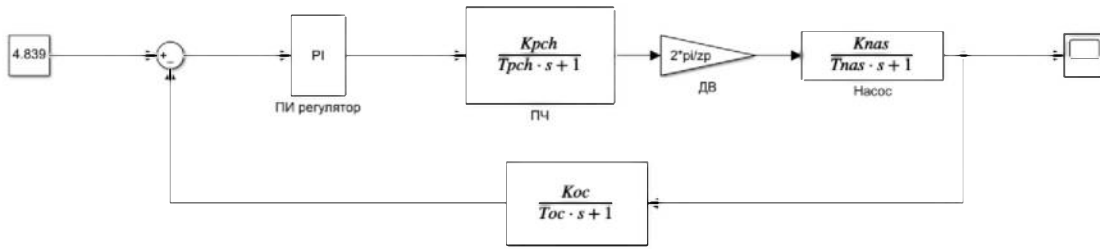


Рисунок 3.3 – Модель контуру регулювання тиску в Simulink

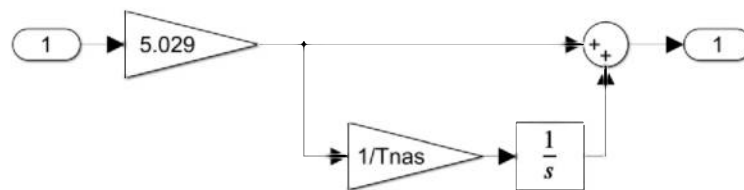


Рисунок 3.4 – Підсистема ПІ-регулятора в Simulink

Передатна функція розімкненого контуру тиску системи визначається наступним чином:

$$W_{\text{РАЗ КД}}(p) = W_{\text{РД}}(p) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{z_p} \cdot \frac{K_{\text{ПЧ}}}{1 + T_{\text{ПЧ}} p} \cdot \frac{K_{\text{нас}}}{1 + T_{\text{нас}} p} \cdot \frac{K_{\text{ос}}}{1 + T_{\text{ос}} p}$$

звідки

$$W_{\text{РД}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\text{ПЧ}} p + 1)(T_{\text{нас}} p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1)}{K_{\text{нас}} + K_{\text{ос}} + K_{\text{ПЧ}}} \cdot \frac{z_p}{2 \cdot \pi}$$

При оптимізації, інерційність у зворотному зв'язку відноситься до малих, тому за малу компенсовану сталу часу приймаються:[8]

$$T_{\mu k} = T_{\mu} + T_{oc} = 0,0002 + 0,1 = 0,1002$$

$$T_{oc} \gg T_{ПЧ}$$

$$T_{ПЧ} \gg T_{\mu}$$

$$W_{PD}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k} p (T_{\mu k} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu k} p + 1)(T_{нас} p + 1)}{K_{нас} + K_{oc} + K_{ПЧ}} \cdot \frac{z_p}{2 \cdot \pi}$$

$$W_{PD}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k} p} \cdot \frac{(T_{нас} p + 1)}{K_{нас} + K_{oc} + K_{ПЧ}} \cdot \frac{z_p}{2 \cdot \pi}$$

Після перетворення зведено вираз до канонічного вигляду:

$$W_{PD} = \frac{T_{нас} p \cdot z_p}{2 \cdot T_{\mu k} \cdot K_{нас} + K_{oc} + K_{ПЧ} \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \frac{(T_{нас} p + 1)}{T_{нас} p}$$

Проаналізувавши отриману передатну функцію регулятора, бачимо, що в подальшому моделюванні потрібно використовувати ПІ-регулятор.

За допомогою інструменту Linear Analysis програмному середовищі Simulink, отриманий перехідний процес контуру регулювання тиску і його показники якості, які представлені на малюнку 44.[9]

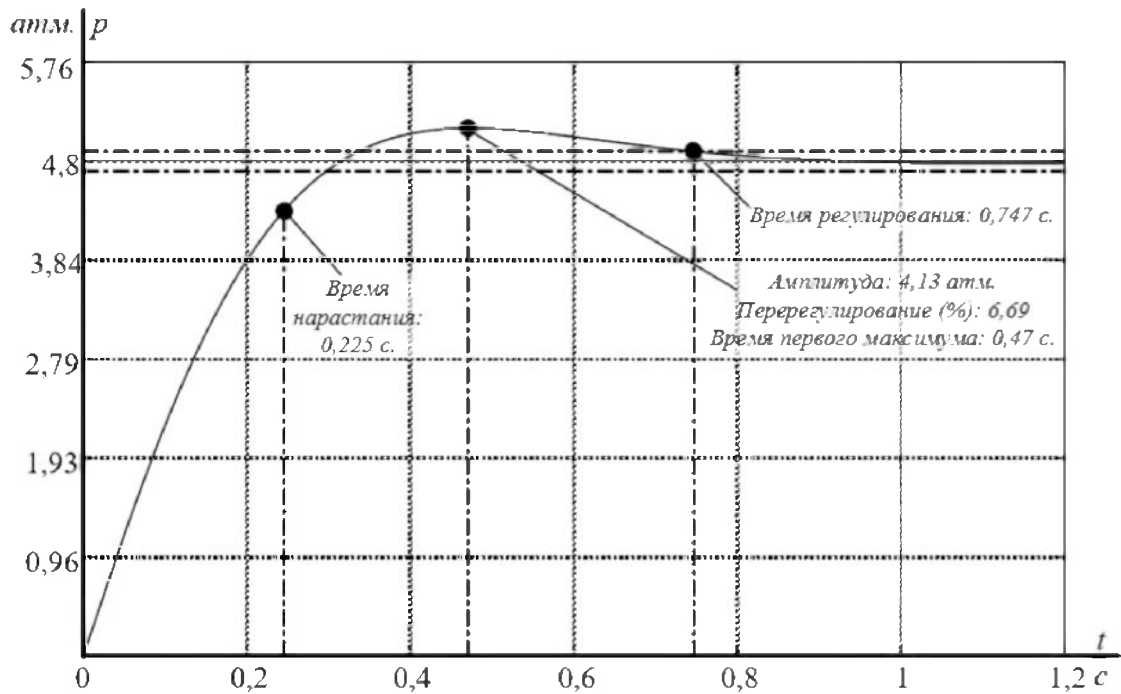


Рисунок 3.5 –Перехідний процес контуру регулювання тиску

3.2 Моделювання системи електроприводу

Для проведення процедури моделювання синтезованої системи скалярного керування електроприводу була складена комп'ютерна модель у програмному пакеті Matlab/Simulink.

Для перевірки адекватності реакції системи на зміни в контурі водоподачі потрібно промоделювати зміни тиску у системі. За допомогою осцилографів Scope проведемо реєстрацію сигналів зміни швидкості обертання валу двигуна, електромагнітного моменту та тиску.

Стабілізація системи підтримується через замкнені негативними зворотними зв'язками контури струму та тиску.

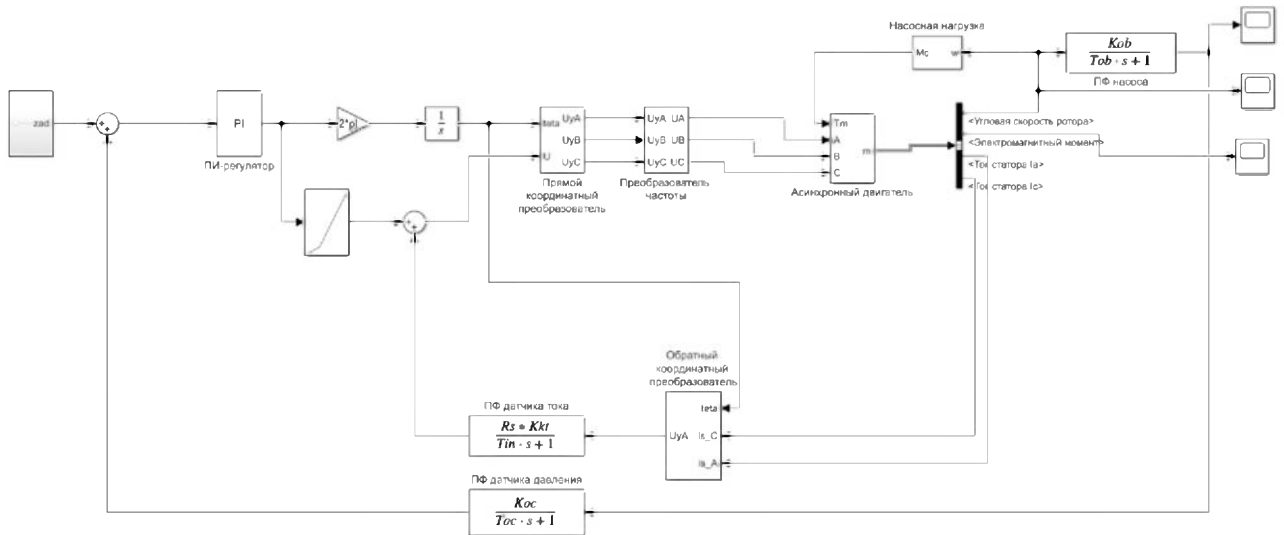


Рисунок 3.6 – Комп'ютерна модель скалярної системи електроприводу зі зворотним зв'язком по тиску

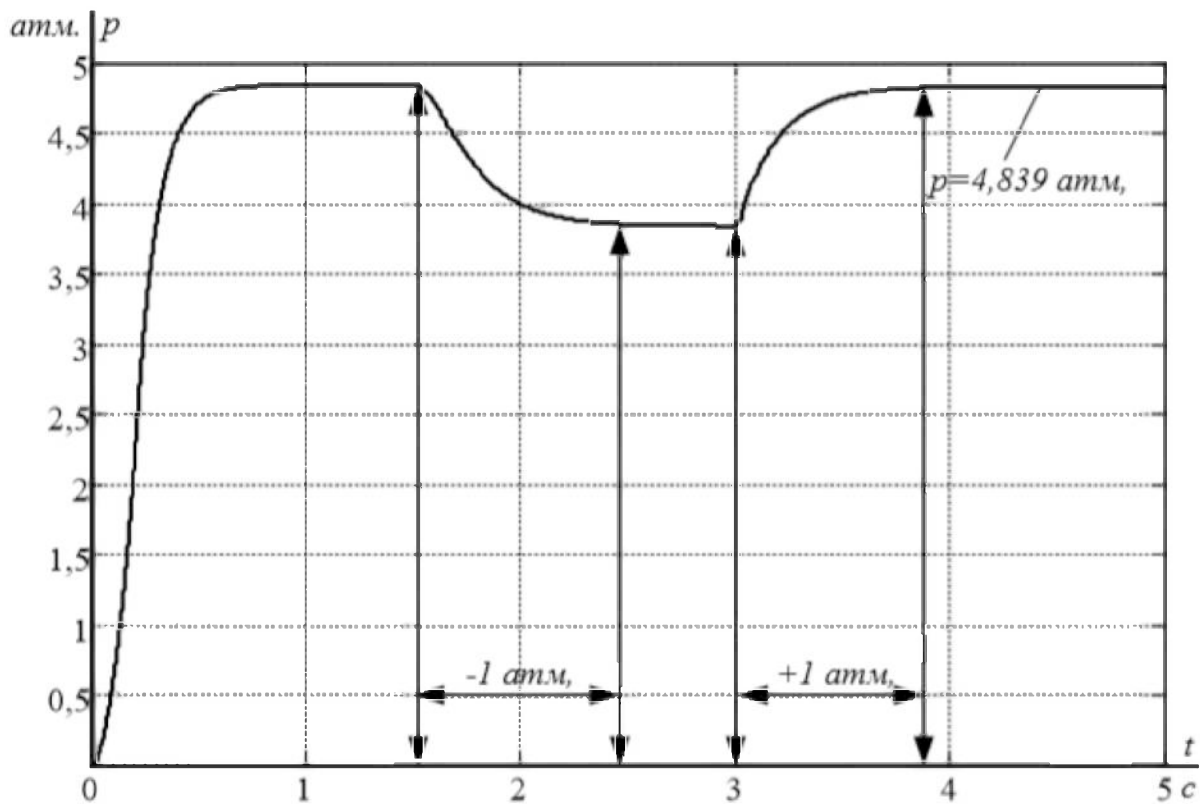


Рисунок 3.7 – Перехідний процес тиску насоса при пуску та зміні тиску

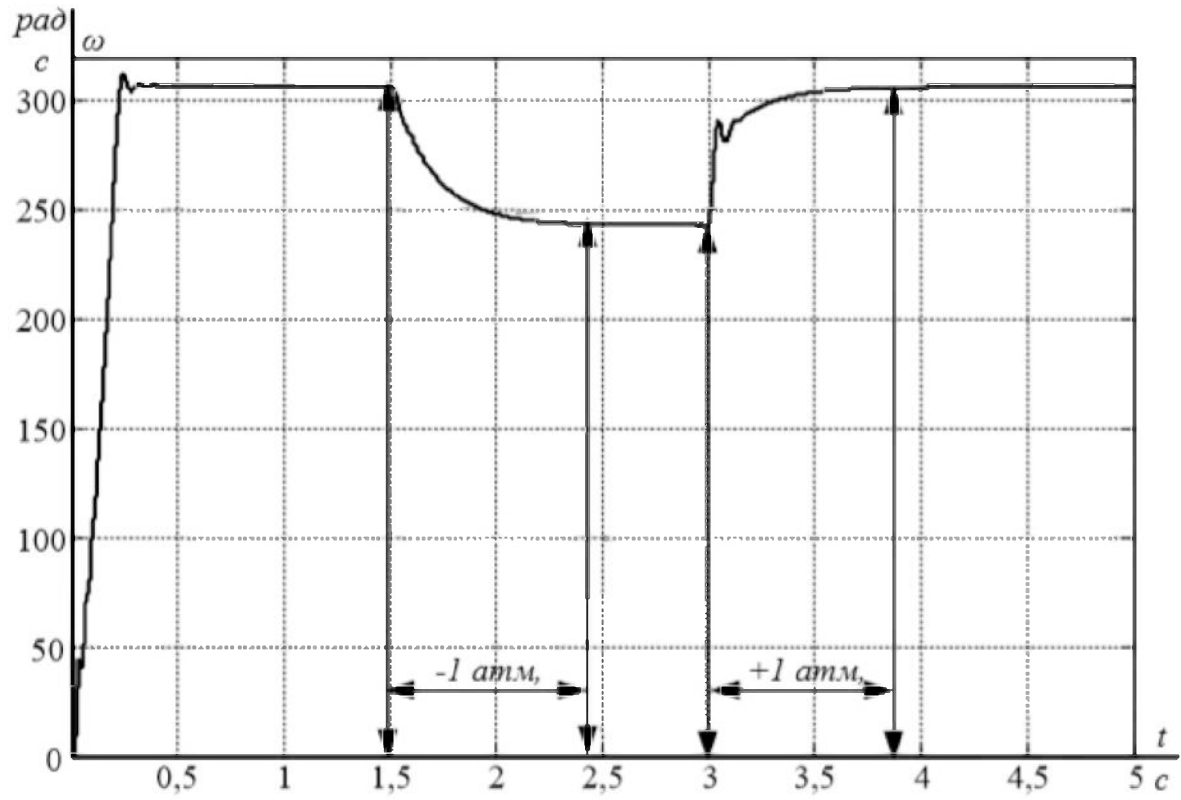


Рисунок 3.8 – Перехідний процес швидкості двигуна під час пуску та зміни тиску

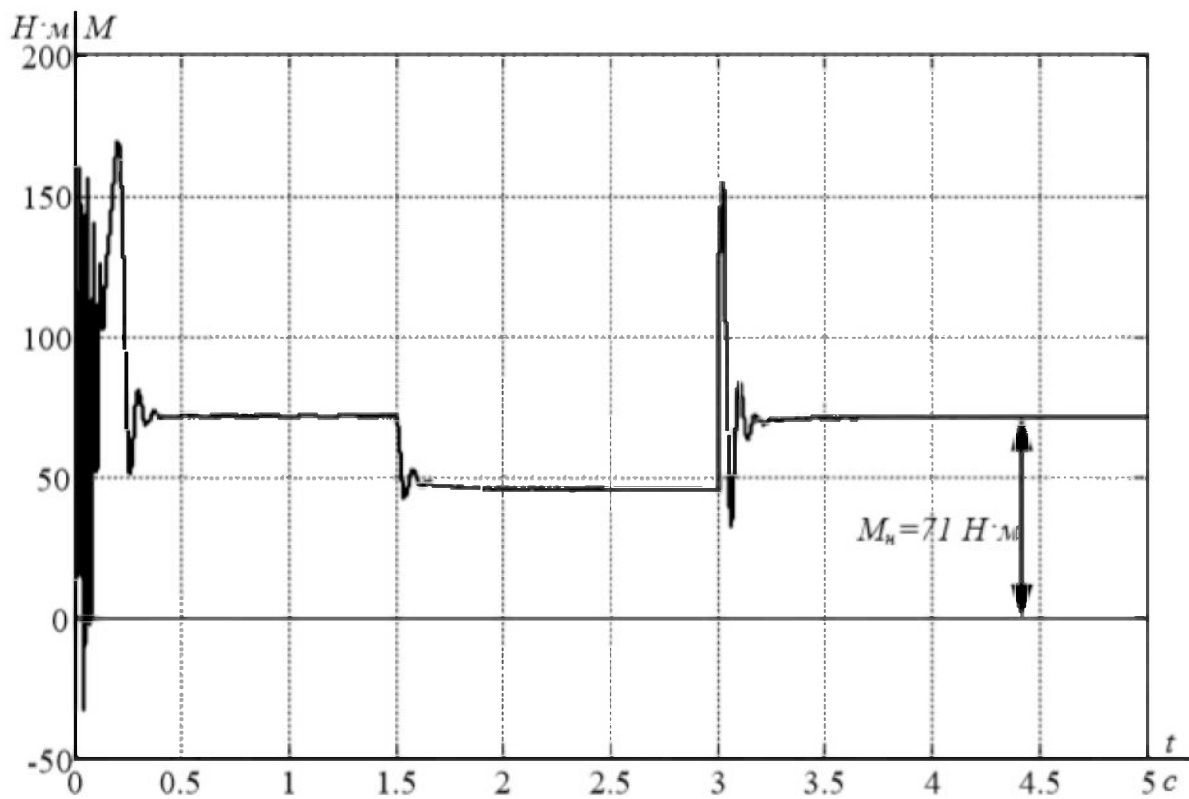


Рисунок 3.9 – Перехідний процес електромагнітного моменту двигуна під час пуску та зміни тиску

Проведені дослідження дають зрозуміти, що розроблена в ході виконання дипломної роботи система електроприводу «перетворювач частоти - асинхронний двигун - відцентровий насос» працює адекватним чином і реагує на зміни тиску, має астатичні властивості та досить швидко реагує на зміни тиску в контурі.

ВИСНОВКИ

При виконанні дипломної роботи були досліджені питання класифікації насосних установок, вивчений принцип роботи та будова відцентрових насосів розглянуто існуючі способи регулювання подачі насосних установок засобами керованих електроприводів.

Для вивчення системи автоматизованого асинхронного електроприводу насосної установки були розраховані механічні та електромеханічні характеристики обраного асинхронного двигуна, виконаний розрахунок енергетичних показників електроприводу.

Синтезована математична модель асинхронного електроприводу насоса за допомогою програмного середовища Matlab/Simulink була досліджена на адекватність реакції на зміни тиску в контурі.

Слід зазначити, що системи скалярного управління мають переваги перед іншими системами керування, зокрема, при застосування в насосних установках, серед них: простота, надійність, мала частка необхідної інформації про двигун, відсутність потреби у датчиках швидкості та положення ротора.

Результати роботи розробленої моделі в режимі підтримки тиску означають про коректність оптимізації технологічного ПІ-регулятора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фащенко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. — 260. с.: ил.
2. Вишневский К. П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. — М.: Агропромиздат, 1986.— 136 с.
3. Петрик А. Д., Подласов А. В., Евреенко Ю. П. Насосы и мелиоративные насосные станции: Учеб. пособие/Под ред. А. Д. Петрика.— Львов: Вища школа, 1987.— 168 с.
4. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Материалы международной научно-технической конференции. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – С. 269–272.
5. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов : учеб. пособ. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
6. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок: Учеб. пособие/Рычагов В. В., Чебаевский В. Ф., Вишневский К. П. и др.; Под ред. В. Ф. Чебаевского. — М.: Колос, 1982. — 320 с.
7. Карелин В. Ф., Новодережкин Р. А. Насосные станции гидротехнических систем. — М.: Энергия, 1980, 288 с.
8. Терёхин В.Б. Разработка моделей элементов и систем автоматизированного электропривода в среде Matlab: учебное пособие / В.Б. Терёхин - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. - 511 с.
9. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами : учебное пособие для вузов. – Л. : Энергоиздат : Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Ремонтні роботи на кабельних лініях електропередачі

Роботи на кабельних лініях у приміщеннях насосних станцій, а також на зовнішніх мережах необхідно проводити з дотриманням вимог, викладених у пункті 6.2 розділу 6 НПАОП 40.1–1.21-98.

Перекладати кабелі й переносити муфти дозволяється, як правило, після відключення напруги кабелю та встановлення його заземлення.

Перекладання кабелів, які перебувають під напругою, допускається за необхідності з виконанням таких вимог:

а) температура кабелю, який перекладається, повинна бути не нижчою за 5 °С;

б) муфти на ділянці кабелю, який перекладається, мають бути жорстко закріплені хомутами на дошках;

в) працювати слід у діелектричних рукавичках, поверх рукавичок для їх захисту від механічних пошкоджень надягаються брезентові рукавиці;

г) роботу повинні виконувати працівники, що мають досвід з прокладання кабелів, під керівництвом особи з групою з електробезпеки не нижче V під час укладання кабелів напругою понад 1000 В і з групою не нижче IV під час укладання кабелів напругою до 1000 В.

Під час перекочування барабана з кабелем необхідно вжити заходів проти захоплення ним частин одягу працівників. Перед початком перекочування закріплюють кінці кабелю і видаляють з барабана цвяхи, якщо вони стирчать з нього. Барабан з кабелем допускається перекочувати лише по горизонтальній поверхні по твердому ґрунту або міцному настилу.

Забороняється використовувати для підвішування кабелів сусідні кабелі, трубопроводи.

Кабелі необхідно підвішувати, не допускаючи їх зміщення.

Експлуатація вимірювальних приладів, пристроїв релейного захисту, автоматики, телемеханіки, засобів зв'язку, електролічильників

З метою гарантування безпеки робіт, що проводяться в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму та напруги слід постійно заземлювати. У складних схемах релейного захисту для групи електрично з'єднаних вторинних обмоток трансформаторів струму незалежно від їх кількості допускається виконувати заземлення лише в одній точці. У разі необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле коло вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

У колах між трансформатором струму і затискачами, де встановлене закорочування, забороняється проводити роботи, які можуть спричинити розмикання кола.

Під час виконання робіт на трансформаторах струму або їх вторинних колах необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

- а) шини первинних кіл не використовувати як допоміжні струмовідні під час монтажу або як струмовідні кола при виконанні зварювальних робіт;
- б) кола вимірювань та захисту приєднати до затискачів зазначених трансформаторів струму після повного закінчення монтажу вторинних схем;
- в) при перевірці полярності до подання імпульсу струму в первинну обмотку прилади, якими її проводять, надійно приєднати до затискачів вторинної обмотки.

Роботи в колах пристроїв релейного захисту електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводяться за виконавчими схемами. Робота без схем забороняється.

Під час робіт у пристроях РЗАіТ необхідно користуватися слюсарномонтажними інструментами з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування та захисту за необхідності в приміщенні насосної станції з електроустановками напругою

понад 1000 В дозволяється залишатися одному працівнику зі складу бригади за умовами роботи; працівник, який перебуває окремо від виконавця робіт, повинен мати групу з електробезпеки не нижче III; цьому працівнику виконавець робіт повинен дати необхідні вказівки з техніки безпеки.

Під час робіт у колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також вимикаються автомати від вторинних обмоток.

У разі потреби у проведенні будь-яких робіт у колах чи апаратурі РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню.

Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури виконувати роботи, які спричиняють сильний струс релейної апаратури, що може спричинити помилкову дію реле.

Записувати показання електролічильників та інших вимірювальних приладів, установлених на щитах керування і в РУ, дозволяється:

а) одноособово оперативним працівникам (машиністам насосних установок) з групою з електробезпеки не нижче III;

б) персоналу енергопостачальних організацій у супроводі машиніста насосних установок з групою з електробезпеки не нижче III.

Установлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні проводити за нарядомдопуском із зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу з електробезпеки не нижче IV, а другий — не нижче III. У разі наявності блоків або спеціальних затискачів, які дозволяють безпечно закорочувати струмові кола, установлення і зняття цих електролічильників, а також їх перевірку ці працівники можуть виконувати за розпорядженням.

Установлення і зняття електролічильників безпосереднього вмикання допускається проводити за розпорядженням одному працівнику з групою з електробезпеки не нижче III. Установлення і зняття електролічильників, а також

приєднання вимірювальних приладів для перевірки виконуються із зняттям напруги.

В РУ насосних станцій персонал виконує роботи в колах обліку відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98.

Приєднання вимірювальних приладів, установлення та зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, які дозволяють безпечно закорочувати струмові кола, виконуються без зняття навантаження та напруги.

Вимірювання електровимірювальними кліщами та вимірювальними штангами в установках напругою понад 1000 В повинні проводити два працівники, один з яких повинен мати групу з електробезпеки не нижче IV, а другий — не нижче III. Ремонтними працівниками вимірювання виконується за нарядомдопуском, а оперативними працівниками або працівником з виїзної бригади — за розпорядженням. У насосних станціях з електроустаткуванням з напругою до 1000 В вимірювання електровимірювальними кліщами може проводити працівник з групою з електробезпеки не нижче III.