

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Підвищення енергоефективності насоса системи водопостачання
тваринницького комплексу**

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТМ-61
спеціальності 141

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Прокопчук І. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Наконечний М. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л. Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Шовкун О. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Прокопчуку Іллі Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення енергоефективності насоса системи водопостачання тваринницького комплексу

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 10 » листопада 2023 року № 4/7-1040 .

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Характеристика перетворювача частоти для управління електродвигуном.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Проектно-конструкторський розділ

3 Розрахунково-дослідницький розділ

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм–61. - Т. : ТНТУ, 2023.

Сторінок – 85, рисунків – 47; таблиць – 5; джерел – 15.

У даній кваліфікаційній роботі запропоновано комп'ютерну модель системи "перетворювач частоти – асинхронний електродвигун – насос", котра дозволяє встановити фазну напругу, при якій модуль фазного струму електродвигуна є мінімальним.

На підставі досліджень, спрямованих на зниження споживання електроенергії, показано, що при зміні напруги за постійної частоти мережі фазний струм статора зменшується на 5–7%, а частота обертання електродвигуна зменшується на 45...85 об/хв при зменшенні тиску в трубопроводі системи водопостачання на 3...5%, що знижує споживання електроенергії. При цьому спостерігається підвищення коефіцієнта потужності при зменшенні реактивної потужності, що поліпшує енергетичні показники.

Ключові слова: електропривід, асинхронний двигун, перетворювач частоти, енергоефективність.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1. Види систем водопостачання, що використовуються на тваринницьких комплексах	11
1.2 Аналіз способів регулювання частоти обертання насосних установок	14
1.3 Способи регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором	16
1.4 Цілі та завдання дослідження	31
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	33
2.1. Постановка завдання щодо зниження споживання електроенергії насосами системи водопостачання	33
2.2. Математична модель системи "асинхронний електропривод – перетворювач частоти"	35
2.3 Створення та обчислення параметрів комп'ютерної моделі системи управління частотним перетворювачем для асинхронного електроприводу насоса	42
2.4 Симуляція процесів оптимізації споживання струму за допомогою комп'ютерної моделі.	44
2.4 Метод адаптивного управління перетворювачем частоти для системи прямого водопостачання	50
2.5 Висновки до розділу	53
3 РОЗРАХУНКОВО–ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	54
3.1 Програма та методика проведення експериментальних досліджень	54
3.3 Обробка та аналіз експериментальних даних	58
3.4 Висновки до розділу	71
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙТИХ СИТУАЦІЯХ	72
4.1 Небезпечні фактори які можуть виникнути при роботі у насосній станції	72

4.2 Організаційні і технічні засоби безпечного проведення робіт з електроустановками напругою до 1 кВ	73
4.3 Експлуатація електрообладнання насосних станцій та агрегатів	73
4.4 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики під час воєнного стану	78
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЧ – перетворювач частоти

АД – асинхронний двигун

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

НА – насосний агрегат

ВСТУП

Енергоспоживання з кожним роком стає все більш актуальним питанням. Обмеженість енергоресурсів та висока вартість електроенергії, є основними факторами які стимулюють до більш ефективного використання електроенергії, зокрема і в сільському господарстві.

Зменшення споживання електроенергії можна досягнути за рахунок зниження втрат що появляються в результаті неякісного електропостачання, аварійних ситуацій, тощо. До 90% втрат в електроприводі припадає на сферу електроспоживання решта 10% припадають на передачу. Одним з шляхів вирішення даного питання в сільському господарстві є використання енергозберігаючих електроприводів, що забезпечують виконання необхідного технологічного процесу і покращують його енергетичні показники.

Оскільки насоси для перекачування води споживають до 25% від всієї електроенергії що затрачається в сільському господарстві, **актуальним** є пошук шляхів покращення їх енергоефективності.

Було виявлено, що серед усіх доступних методів регулювання найбільш відповідним є ШІМ-регулювання. Цей метод дозволяє комбіновано змінювати частоту і напругу мережі, що в результаті призводить до досягнення максимального рівня енергозбереження.

У скалярних законах управління, які використовуються в перетворювачах частоти, немає адаптивності частоти і напруги під різні режими роботи насосного агрегату, що призводить до перевитрати електроенергії. Для підвищення енергоефективності необхідно розробити адаптивний алгоритм управління перетворювачем частоти, який би автоматично регулював параметри електричного струму, таким чином, щоб забезпечити мінімальне споживання електроенергії. Для досягнення цієї мети було сформульовано наступні завдання дослідження [10].

Мета і завдання дослідження. Метою дипломної роботи є забезпечення режимів роботи адаптивного способу керування перетворювача частоти насосного агрегату системи водопостачання.

Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

1. Розробити математичну модель регулювання обертової частоти електроприводу насосних агрегатів, використовуючи технологію ШІМ-перетворювачів.

2. Проаналізувати метод регулювання обертової частоти електропривода, спрямований на максимальне зниження витрат електроенергії приводною системою.

3. Обґрунтувати структуру системи управління ШІМ-перетворювачем для регулювання обертової частоти насосних агрегатів з підтриманням сталого тиску.

Об'єкт дослідження – електропривід насосу системи водопостачання тваринного комплексу.

Предмет дослідження – закономірності зміни частоти обертання асинхронного електроприводу від зміни величини фазного струму.

Наукова новизна отриманих результатів:

Запропоновано адаптивний спосіб управління перетворювачем частоти для регулювання частоти обертання асинхронного електроприводу насосного агрегату за рахунок підтримки найменшого струму в обмотці статора.

Практичне значення отриманих результатів

Запропонований адаптивний спосіб управління ШІМ перетворювача насосного агрегату та дозволяє зменшити електроспоживання та підтримувати постійний тиск в трубопроводі в системі водопостачання.

Апробація результатів магістерської роботи.

Вибрані положення роботи доповідалися на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль 6-7 грудня 2023.

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (15 найменувань). Загальний обсяг текстової частини: 85 сторінок, 5 таблиць, 47 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Види систем водопостачання, що використовуються на тваринницьких комплексах

У більшості тваринницьких комплексів для систем водопостачання застосовують нерегульований асинхронний електропривід, який обирають на максимальну витрату води, і, через нерівномірність добового графіку, він споживає максимальну кількість електроенергії в години меншого водоспоживання.

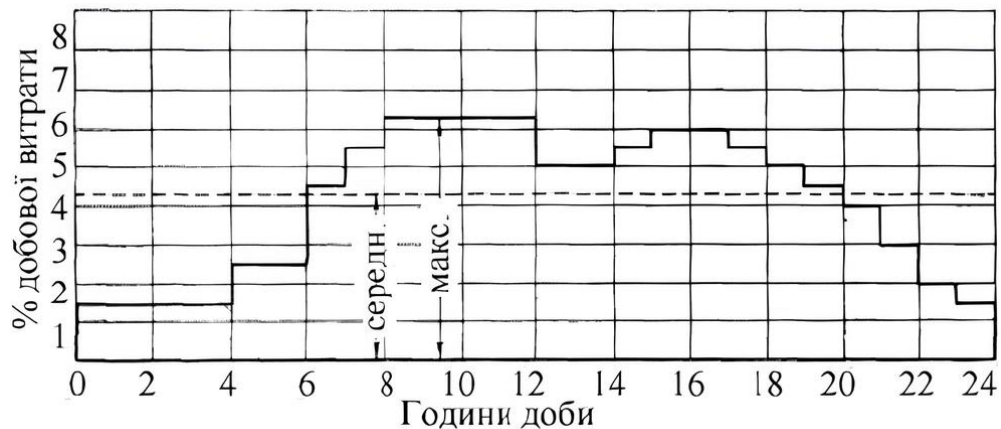


Рисунок 1.1 – Добова діаграма водоспоживання тваринницьким комплексом

Потужність двигуна насосної установки:

$$P = \frac{k_3 \cdot \rho \cdot Q_n \cdot H_n}{\eta_n \cdot \eta_p}, \quad (1.1)$$

Де k_3 - коефіцієнт запасу;

ρ - питома густина рідини, що перекачується, Н/м³ ;

Q_n - номінальна подача, м³ /с;

H_n - номінальний напір, м;

η_n - ККД насосу;

η_p - ККД приводу насоса.

З формули (1.1) можна зробити висновок, що потужність прямопропорційно пов'язана із напором та подачею рідини.

Система водопостачання - це комплекс інженерних споруд та технічних пристроїв для забору, обробки до необхідної якості, транспортування і розподілу води між споживачами. Організація та взаємне розташування окремих компонентів системи водопостачання залежать від її призначення, місцевих природних умов і санітарних вимог до води.

У випадку системи баштового водопостачання вода піднімається насосним агрегатом з відкритого джерела до водонапірної башти, де вона накопичується і, використовуючи гравітаційну силу, подається в основний магістральний водопровід, який подає воду до кінцевих споживачів.

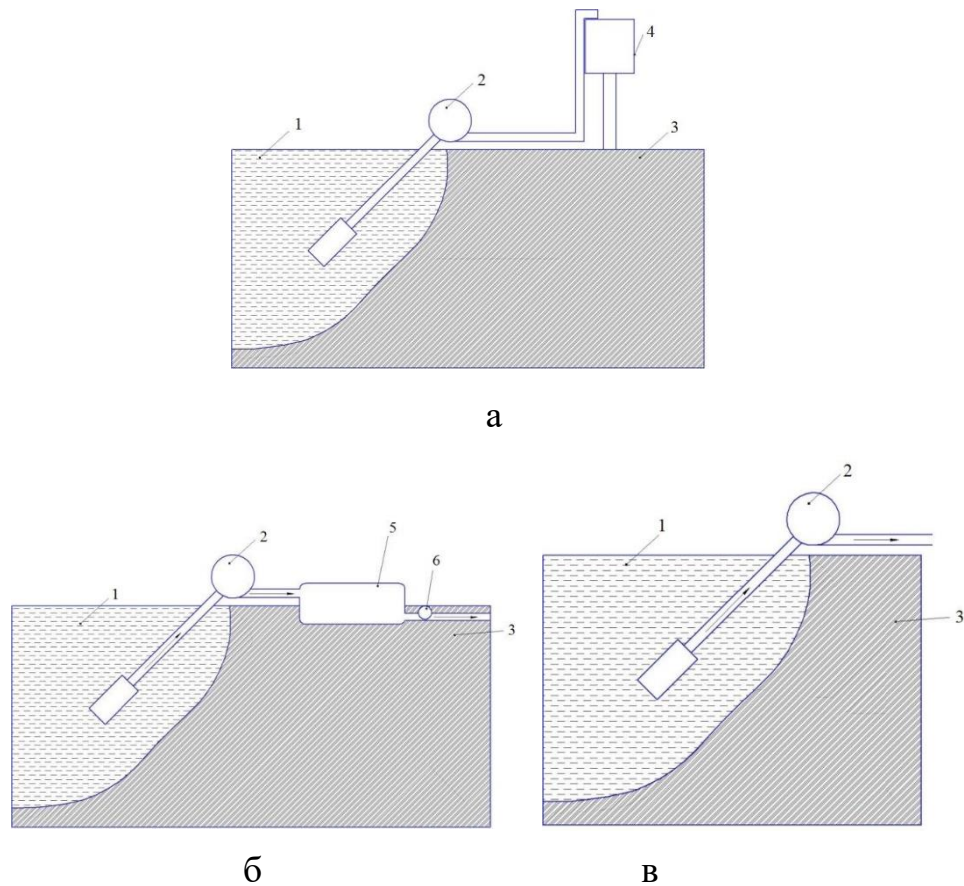


Рисунок 1.2 - а - система баштового водопостачання; б - система резервуарного водопостачання; в - система протічного водопостачання: 1 - водойма; 2 - насосна станція; 3 - ґрунт; 4 - водонапірна башта; 5 - резервуар; 6 - проміжний насос.

Недоліком баштових систем водопостачання є наявність водонапірної башти, яка є складним інженерним об'єктом, що вимагає додаткових витрат на її монтаж, ремонт, та обслуговування. У зимовий період водонапірна башта може замерзнути, що призведе до припинення водопостачання споживачів. Несправність може призвести до серйозних фінансових витрат, пов'язаних з втратою продукції, витратами на ремонт обладнання та відновлення водопостачання.

У системі із резервуарним водопостачанням (рисунок 1.2 б) вода із джерела за допомогою насосної установки закачується в резервуар .

Регулювання рівня води в резервуарі систем водопостачання здійснюється за допомогою датчиків рівня. Цей спосіб дозволяє підтримувати стабільний рівень води в резервуарі, що є важливим для забезпечення нормального водопостачання.

Система прямоточного водопостачання є різновидом системи сільськогосподарського водопостачання, в якій вода з джерела надходить безпосередньо до споживачів без попереднього зберігання в резервуарі. Щоб забезпечити необхідний тиск і обсяг води для всіх споживачів, в прямоточних системах водопостачання використовують датчики тиску. Датчики тиску розташовані на початку магістрального трубопроводу і в останнього споживача. Вони вимірюють тиск води в системі і передають інформацію на блок управління, який регулює насосним агрегатом.

Сучасна система водопостачання, яка постачає воду безпосередньо до споживачів без попереднього накопичення в резервуарі, є найбільш актуальною і зручним варіантом для споживачів. Це пояснюється тим, що вона забезпечує постійний тиск води в магістральному трубопроводі, навіть у найдальших точках системи. Завдяки відсутності резервуарів для зберігання води, система прямотічного водопостачання є більш компактною і економічною, ніж системи з резервуарами.

1.2 Аналіз способів регулювання частоти обертання насосних установок

У системах водопостачання в якості електроприводу для насосних агрегатів широко використовують асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, оскільки вони є надійними та простими у виготовленні. Однак основним недоліком цих електродвигунів є ускладненість регулювання частоти обертання.

Регулювання обертового моменту можна здійснити як електричним, так і механічним методами. Механічні методи, такі як зміна передавального числа механічної передачі або використання механічних варіаторів, забезпечують регулювання швидкості, але це супроводжується втратою плавності і складністю в технічній реалізації.

Механічні методи регулювання також характеризуються низькою ефективністю, обмеженим діапазоном регулювання, складнощами в обслуговуванні та низькою довговічністю деталей. Враховуючи це, для регулювання електроприводів насосних агрегатів віддають перевагу електричним методам.

Електричні методи включають в себе зміну частоти обертання електродвигуна за допомогою пристроїв керування, що забезпечує більш ефективне та плавне регулювання.

Регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів, що використовуються в насосних агрегатах систем водопостачання, є ключовим завданням, оскільки це дозволяє підвищити ефективність їхньої роботи.



Рисунок 1.3 - Способи регулювання частоти обертання асинхронного електроприводу

Частота обертання ротора асинхронного електродвигуна визначається з виразу

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} (1 - s), \quad (1.2)$$

Де f - частота змінного струму мережі живлення, Гц;

p - число пар полюсів електродвигуна;

s - ковзання електричного двигуна .

Згідно формули (1.2) можна прийти до висновку, що регулювання частоти обертання можна здійснити зміною таких параметрів:

- ковзання;
- пар полюсів;
- частоти мережі
- напругою мережі

1.3 Способи регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Принцип роботи асинхронного двигуна базується на законі електромагнітної індукції. Фазні обмотки статора з'єднуються з трифазною мережею. Струми в цих обмотках породжують обертове магнітне поле. Частота обертання цього магнітного поля n залежить від частоти живильної напруги f та кількості пар полюсів p двигуна: $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$. Це поле наводить ЕРС в замкненій обмотці ротора.

У результаті взаємодії струму в обмотці ротора, породженого дією цієї електромагнітної сили із обертовим магнітним полем виникає сила, яка діє на провідники обмотки ротора. Ця сила створює обертовий момент в напрямку обертання магнітного поля, і ротор починає рух з частотою, меншою за частоту обертання поля статора. Частоту обертання ротора n_2 в порівнянні з частотою обертання магнітного поля статора n_1 характеризує відносна величина, яку називають ковзанням.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1.3)$$

Для сучасних АД характерно ковзання в діапазоні від 0,02 до 0,06. Однією з ключових властивостей будь-якого електричного двигуна, що визначає його операційні характеристики, є зв'язок між частотою обертання та електромагнітним моментом $n_2 = f(M)$, і ця залежність називається механічною характеристикою (рис. 1.4, б).

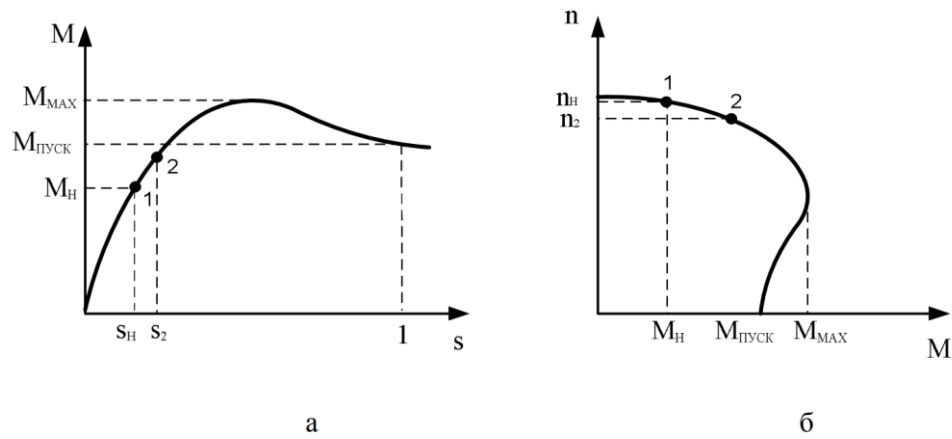


Рисунок 1.4 - Механічна характеристика асинхронного двигуна із короткозамкнутим ротором

Про можливості двигуна можна судити за його робочими характеристиками, якими є залежності n_2 , s , M , I_1 , $\cos\varphi$, η від корисної потужності P_2 на валу двигуна, коли $U_1 = const$ і $f = const$ (рис. 1.5). Ці характеристики формуються шляхом вимірювання відповідних параметрів під різними навантаженнями двигуна, а також на основі результатів дослідження роботи машини в режимі холостого ходу.

Розглянемо, як змінюється ця залежність при збільшенні навантаження двигуна. Одна з таких характеристик - залежність обертового моменту: $M = f(P_2)$.

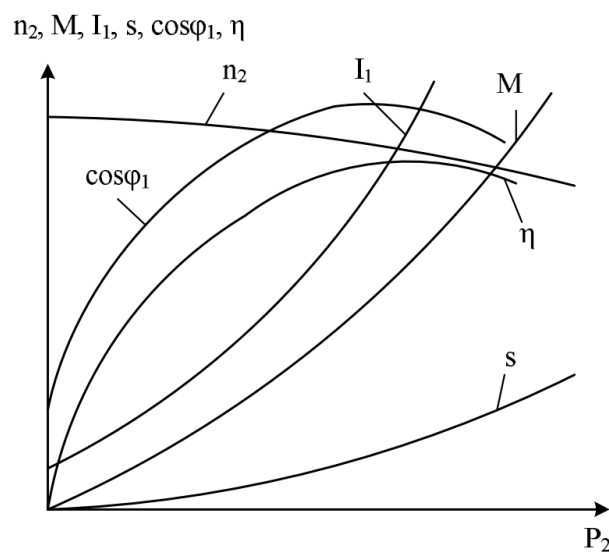


Рисунок 1.5 – Робочі характеристики асинхронного двигуна в залежності від корисної потужності

Відомо, що $M = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{P_1 \cdot 60}{2\pi n_2}$, де ω_2 - кутова механічна швидкість обертання ротора.

Оскільки зі збільшенням потужності P_2 частота обертання ротора зменшується, залежність $M = f(P_2)$ відрізняється від лінійної. Цим також пояснюються характеристики $s = f(P_2)$ і $n = f(P_2)$

В досліді холостого ходу $P_2 = 0$ струм статора дорівнює струму холостого ходу ($I_1 = I_{1X}$) і в залежності від величини повітряного зазору може складати 40-60% номінального значення I_{1H} . З ростом навантаження збільшується струм I_2 в колі ротора, що викликає відповідне збільшення струму I_1 в колі обмотки статора.

Характеристика коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ показує, як зі збільшенням навантаження змінюється відношення активної потужності P_1 , яку двигун споживає з мережі, до повної потужності S_2 , що враховує і реактивну потужність Q_1 , необхідну для створення обертового магнітного поля, $\cos \varphi_1 = P_1/S_1$.

Так, в режимі холостого ходу двигун витрачає значну реактивну потужність Q_1 , і лише невелика частина активної потужності використовується для компенсації втрат у самому двигуні. Це призводить до низького значення коефіцієнта потужності при холостому ході, зазвичай у межах 0,15...0,2. При збільшенні навантаження зростає активна потужність P_1 , але реактивна потужність Q_1 збільшується незначно. Коефіцієнт корисної дії двигуна визначається відношенням корисної потужності на валу P_2 до потужності P_1 , яку двигун споживає з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

Потужність P_1 дорівнює сумі корисної потужності P_2 і потужності всіх втрат у двигуні. Максимального значення ККД досягає, коли змінні втрати дорівнюють постійним. У більшості двигунів цей максимум ККД спостерігається при навантаженні, яке приблизно дорівнює 75% від

номінального, оскільки двигуни проектуються з урахуванням того, що вони не завжди повністю завантажені

Можливі способи регулювання частоти обертання n_2 можна встановити в результаті аналізу виразу (1.5), записаного відносно n_2 :

$$n_2 = n_1(1 - s) \quad \text{або} \quad n_2 = \frac{60f}{p}(1 - s), \quad (1.5)$$

Регулювання частоти обертання шляхом зміни ковзання s пов'язане із зміною активного опору в колі ротора і, отже, можливе лише для двигунів із фазним ротором. Однак через значні втрати потужності в колі ротора цей метод ще не є економічно ефективним.

Регулювання частоти обертання зміною числа пар полюсів

У високошвидкісних двигунах регулювання частоти обертання здійснюють зміною числа пар полюсів.

Практично це здійснюється вибором схеми обв'язки статора, що дозволяє найбільш простим переключенням котушкових груп змінювати напрям струму в окремих провідниках, а разом з цим і число пар полюсів.

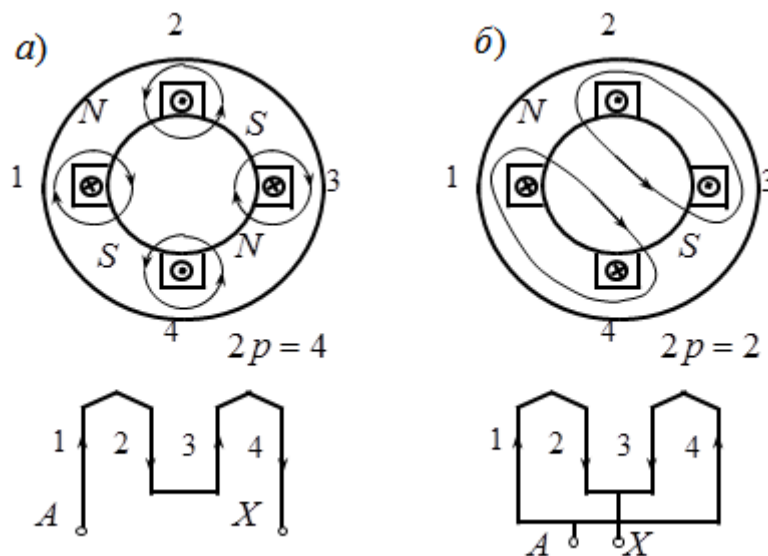


Рисунок 1.6 – Схеми перемикання числа пар полюсів

На рис. 1.6, а показана елементарна схема обвитки з чотирьох послідовно сполучених провідників, що утворюють $2p = 4$, а на рис. 1.6, б – схема з тих же чотирьох провідників, але сполучених паралельно, що утворюють $2p = 2$.

В схемах обвиток на рис. 1.8, а і б збережено послідовне з'єднання провідників, але порядок з'єднання їх різний. Відповідно до цього різне і число пар полюсів.

Момент, що розвивається двигуном, в загальному випадку записують рівнянням

$$M = c_1 p \Phi_0 I_2 \cos \psi_2 \quad (1.6)$$

При будь-якому числі полюсів значення струму I_2 повинне зберігатися незмінним, а $\cos \psi_2$ величина, близька до одиниці. Тоді формулу (1.6) можна записати:

$$M = c_2 p \Phi_0, \quad (1.7)$$

Виразимо момент через відношення потужності та швидкості:

$$M = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{P}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{P}{\frac{2\pi f_1}{p}} = c'' \cdot P \cdot p, \quad (1.8)$$

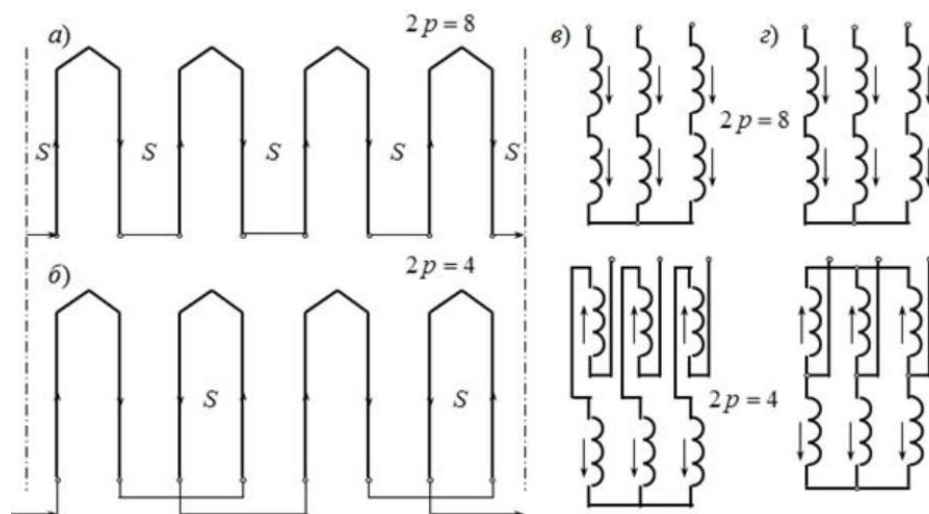


Рисунок 1.7 – Можливі схеми перемикування пар полюсів

Прирівняємо праві частини рівнянь (1.7) і (1.8) і замінивши потік електрорушійною силою отримаємо рівняння:

$$P = \frac{c_1 \Phi_0 p}{c_2 p} = c_3 \cdot \frac{E_1}{4,44 f_1 w_1} = c_3 \cdot \frac{E_1}{w_1} = c \cdot \frac{U_{1\phi}}{w_1}, \quad (1.9)$$

З рівняння (1.9) виходить, що потужність двигуна прямо пропорційна величині фазної напруги і обернено пропорційна до числа витків, послідовно включених у фазу обвитки.

Після перемикання обвитки за схемою рис. 1.7, в число послідовно включених витків у фазі і фазну напругу залишають тими ж, що і до перемикання. Значить, потужність двигуна до перемикання і після нього не змінюється хоча частота обертання і змінилася удвічі [6].

При перемиканні з $2p = 8$ на $2p = 4$ за фазна напруга залишається тією ж самою, а число витків зменшується удвічі. При цьому удвічі збільшується потужність. При зменшенні удвічі послідовно включених витків у фазі та збільшенні частоти обертання теж удвічі ЕРС, індукована у фазі, залишається незмінною і двигун може бути підключений до мережі з тією ж напругою.

Двигуни з регулюванням частоти обертання перемиканням полюсів виготовляють дво-, три- і чотиришвидкісними [3].

Перемикання числа пар полюсів на статорі можна досягти таким чином:

1. Укласти на статор одну обвитку і змінювати число пар полюсів шляхом відповідного перемикання її частин;
2. Виконати на статорі дві незалежні один від одного обвитки;
3. Виконати на статорі дві незалежні один від одного обвитки - кожен з перемиканням полюсів.

Недоліки даного методу в тому, що зміною числа пар полюсів можна регулювати частоту обертання двигуна лише дискретно.

Частотне регулювання

Метод частотного регулювання швидкості обертання двигуна досягається за допомогою зміни частоти обертання вала насоса. У цьому випадку втрати енергії на дроселювання відсутні, і тому за всіх режимів обертання можна забезпечити високий ККД установки за винятком окремих випадків роботи насосного агрегату в системі із великим статичним напором [1].

У свою чергу, складність застосування якісного методу полягає в тому, що найпростіші, широко поширені асинхронні електродвигуни не дають змоги змінювати частоту обертання валу для регулювання робочих характеристик насосних агрегатів і вимагають застосування додаткових дорогих електричних пристроїв, що ускладнюють насосну установку загалом. Однак досягнута економія електроенергії швидко відшкодовує витрати на придбання додаткових пристроїв для зміни частоти обертання і тому цей метод регулювання знаходить дедалі ширше застосування [15].

Частотне регулювання передбачає використання спеціальних джерел живлення зі змішаною частотою. За рахунок швидкого розвитку напівпровідникової техніки цей метод стає все більш поширеним. Особливо важливе застосування такого регулювання знаходить у тяговому електроприводі, оскільки воно забезпечує плавне та безступінчате регулювання частоти f_1 дає можливість так само плавно змінювати частоту обертання двигуна n , а значить, і швидкість руху потоку води [14].

Втім, частотне регулювання не обмежується лише зміною частоти f_1 ; воно також передбачає зміну значення напруги живлення U_1 . Закони її зміни можуть варіюватися в залежності від характеристик, які ви хочете надати двигуну, а причини необхідності регулювання будуть пояснені далі.

Індуктивний опір короткого замикання $x_k = \omega_1 L_k = 2\pi f_1 L_k$, і формула набере вигляду

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{8\pi^2 f_1^2 L_k} = \pm c_{mm} \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (1.10)$$

де $c_{mm} = pm_1 / (8\pi^2 L_k)$ - стала.

При одночасній зміні частоти обертання величина коефіцієнта перевантажувальної здатності також змінюється. Наприклад, при підвищенні швидкості руху електровозу у 1,41 рази, також у стільки ж разів збільшується і частота обертання. Таким чином, за незмінного значення коефіцієнта перевантажувальної здатності максимальний момент зменшується у $(1,41)^2=2$ рази, що може виявитися неприпустимим по умовах стійкої роботи двигуна.

Зміна частоти f_1 при незмінному значенні U_1 призводить до змін в оберненій пропорційності магнітного потоку Φ , оскільки $U_1 \approx E_1$. Така ситуація неприйнятна, оскільки зі збільшенням магнітного потоку відбудеться суттєве насичення магнітного кола та збільшення намагнічування індуктивного струму. Зменшення ж потоку призведе до недостатнього використання машини і, як вже було зазначено, знизить її здатність до перевантаження.

Основний закон регулювання частоти виражений М. П. Костенко формулою:

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}}, \quad (1.11)$$

де U_1 , f_1 і M - поточні значення напруги, частоти і обертального моменту.

Наприклад, якщо при частотному регулюванні необхідно мати $M = M_{ном}$, то вираз (1.11) дістає, вигляд $U_1 / f_1 = U_{1ном} / f_{1ном} = const$, тобто при зміні частоти f_1 треба пропорційно змінювати і напругу U_1 .

Формула (1.11) дозволяє визначити взаємозалежність U_1 і f_1 при будь-яких умовах, що вимагаються.

Для забезпечення стійкої роботи асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором у ШІМ-перетворювачі необхідно зберігати визначене відношення між вхідними та вихідними параметрами напруги і частоти мережі, яка живить електродвигун. Це відношення залежить від механічних характеристик конкретного насоса.

Ці співвідношення виводяться з рівняння частотного регулювання М.П. Костенка, опубліковані 1925 року :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}, \quad (1.12)$$

Для насосних агрегатів, які функціонують без статичного напору, та їхні механічні характеристики описуються квадратичним рівнянням, необхідно дотримуватися наступного взаємозв'язку:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_2}{f_2^2}, \quad (1.13)$$

У випадку насосних агрегатів, які працюють зі статичним напором, необхідно дотримуватися більш складних взаємозв'язків:

$$\frac{U_1}{f_1^{1+\frac{k}{2}}} = \frac{U_2}{f_2^{1+\frac{k}{2}}}, \quad (1.14)$$

Перетворювач частоти з прямим зв'язком під'єднується до статорного кола асинхронного електродвигуна та використовується для конвертації напруги стандартної частоти на напругу, яка може змінюватися в певних межах щодо значення та частоти.

Кожну фазу асинхронного двигуна живлять від свого реверсивного перетворювача. Напруга, яка подається на обмотку фази статора:

$$U_\phi = k_{cx} \cdot U_\Delta \cdot \cos\alpha, \quad (1.15)$$

де k_{cx} - коефіцієнт схеми;

U_Δ - лінійна напруга мережі живлення, В;

$\cos\alpha$ - кут управління вентилів.

Установлюючи кут керування α (α в , α п) відповідно до поточної частоти і утримуючи його сталим протягом одного напівперіоду вихідної частоти перетворювача, та перемикаючи групи вентилів перетворювача з кутом керування α н = α в протягом другого напівперіоду, можна отримати змінну напругу прямокутної форми із заданою частотою.

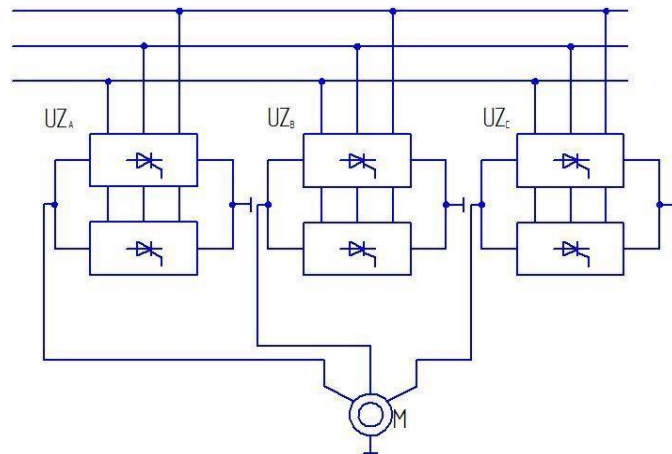


Рисунок 1.9 - Схема перетворювача частоти з
безпосереднім зв'язком

Якщо фази вихідних напруг перетворювачів, які живлять фази В і С (рисунок 1.10), зсунути відповідно на $2/3\pi$ і $4/3\pi$, можна отримати трифазну систему напруг прямокутної форми із заданою частотою та амплітудою напруги. Механічні характеристики електропривода НПЧ-АД наведено на рисунку 1.11.

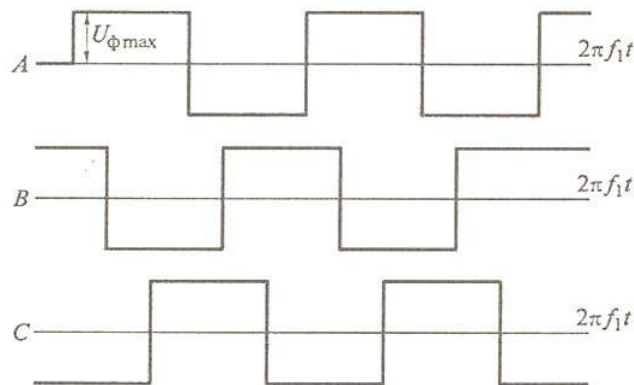
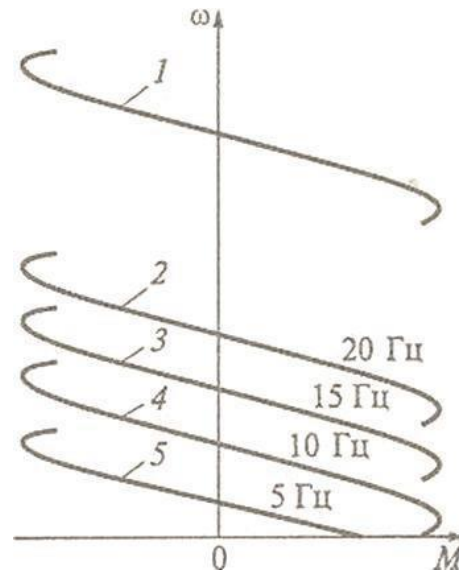


Рисунок 1.10 - Епюри напруг перетворювача частоти з
безпосереднім зв'язком за прямокутної форми напруги



1 - природна; 2... 5 - при частотному регулюванні

Рисунок 1.11 - Механічні характеристики електропривода НПЧ-АД

Якщо α_B і α_H протягом кожного напівперіоду заданої частоти регулювати за синусоїдальним законом

$$\alpha_B = \alpha_H = A \arccos(2\pi \cdot f_1 \cdot t), \quad (1.16)$$

Де

$$A = \frac{U_{1H} \cdot f_1^*}{k_{cx} \cdot U_L}$$

то середні фазні напруги матимуть синусоїдальну форму:

$$U_A = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$$

$$U_B = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_1 \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$U_C = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_1 \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Для отримання прийнятної форми вихідної напруги частота напруги живлення мережі має бути в декілька раз вищою за частоту вихідної напруги.

Перетворювачі частоти з прямим зв'язком надають змогу при частоті живлення 50 Гц отримати вихідну частоту в діапазоні 0...20 Гц. Такі асинхронні електроприводи часто використовуються для повільних безредукторних електроприводів середньої та високої потужності [8].

Оскільки ШІМ-керування відбувається за допомогою мікроконтролера, існує можливість впровадження системи автоматичного регулювання продуктивності насоса за напором через використання зворотного зв'язку. Переваги цього методу:

1) Можливість плавного регулювання частоти обертання двигуна в широкому діапазоні частот;

2) Через те, що зі зміною частоти змінюється і напруга, цей метод дозволяє зменшити енергоспоживання електропривода насоса в години низького водоспоживання;

3) Наявність елементів керування у вигляді випрямляча та інвертора дозволяє використовувати для живлення двигунів не трифазну, а однофазну систему, що є великою перевагою для домашніх споживачів, це дозволить не переоцінювати потужність трифазного двигуна при використанні для живлення однофазної системи електропостачання;

4) Можливість впровадження різних функцій, крім регулювання кутової швидкості;

5) Оскільки відбувається спільне регулювання частоти і напруги, то регулювання кутової швидкості відбувається без зниження моменту на валу двигуна.

Для регулювання частотою обертання асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором у сучасному електроприводі використовують два методи керування ШІМ-перетворювачами:

- скалярне керування;
- векторне керування.

Системи управління, використовуючи скалярні методи, базуються на зміні амплітуди напруги та частоти відповідно до закону $U/f = const$. Під час управління U/f напруга і струм розглядаються як скалярні величини, і зазвичай частота приймається за незалежний параметр. Скалярні системи керування забезпечують стабільність перевантажувальної здатності електропривода

незалежно від частоти і зниження моменту, який розвивається двигуном, на низьких частотах обертання [8].

Найширший діапазон регулювання частоти обертання електродвигуна за постійного моменту опору за скалярної системи керування становить 1:10.

Закон М.П. Костенка записується таким чином:

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu}, \quad (1.17)$$

де γ - відносна напруга статора, ;

α - відносна частота статора,;

μ - відносний момент статора,

Недоліки скалярних систем управління полягають у наступному:

1) Неможливість регулювання швидкості обертання на валу під навантаженням без датчика швидкості на валу двигуна, оскільки вона залежить від навантаження;

2) Неможливість регулювання моменту на валу двигуна.

Для вирішення цієї проблеми, було впроваджено метод векторного управління. Він передбачає включення математичної моделі електропривода в систему управління, що дозволяє розраховувати момент і частоту обертання на валу. Для цього методу управління потрібно встановити датчики струму для всіх фаз статора електродвигуна.

Векторні системи поділяють на:

1. Бездатчикові системи (без датчика на валу двигуна), які використовуються при невеликих діапазонах регулювання частоти обертання (не більше 1:100).

2. Системи з зворотнім зв'язком за швидкістю використовуються для регулювання частоти обертання вала в широкому діапазоні, досягаючи співвідношення до 1:10000 і більше.

Під час використання векторного управління досягаються такі переваги:

1) Точність регулювання частоти обертання електропривода;

2) Плавне регулювання частоти обертання електродвигуна при низьких частотах;

3) Забезпечення номінального моменту на валу при низькій швидкості (за наявності датчика швидкості);

4) Швидка реакція при зміні навантаження на валу.

Розрізняють такі види векторного управління:

1. Пряме управління моментом. У системах з прямим управлінням моментом керуючою величиною є потокозчеплення статора Ψ_1 , а всі необхідні обчислення і формування керуючих впливів здійснюють тільки в нерухомій системі координат.

2. Трансвекторне управління дозволяє індивідуально регулювати магнітний потік та момент асинхронного електродвигуна, використовуючи незалежні компоненти струму статора, що відповідають проєкціям вектора струму на координатні осі, орієнтовані відповідно до [10].

У сучасних перетворювачах частоти реалізовано кілька законів керування:

Лінійний закон керування

$$\frac{U}{f} = const$$

Квадратичний закон керування

$$\frac{U}{f^2} = const$$

Кубічний закон управління

$$\frac{U}{f^3} = const$$

У ступені 1,5 закон управління

$$\frac{U}{f^{1,5}} = const$$

У ступені 1,7 закон управління

$$\frac{U}{f_{1,7}} = const$$

Закон керування, програмований користувачем за 3-5 точками.

Графіки стандартних законів керування перетворювачами частоти наведено на рисунку 1.12.

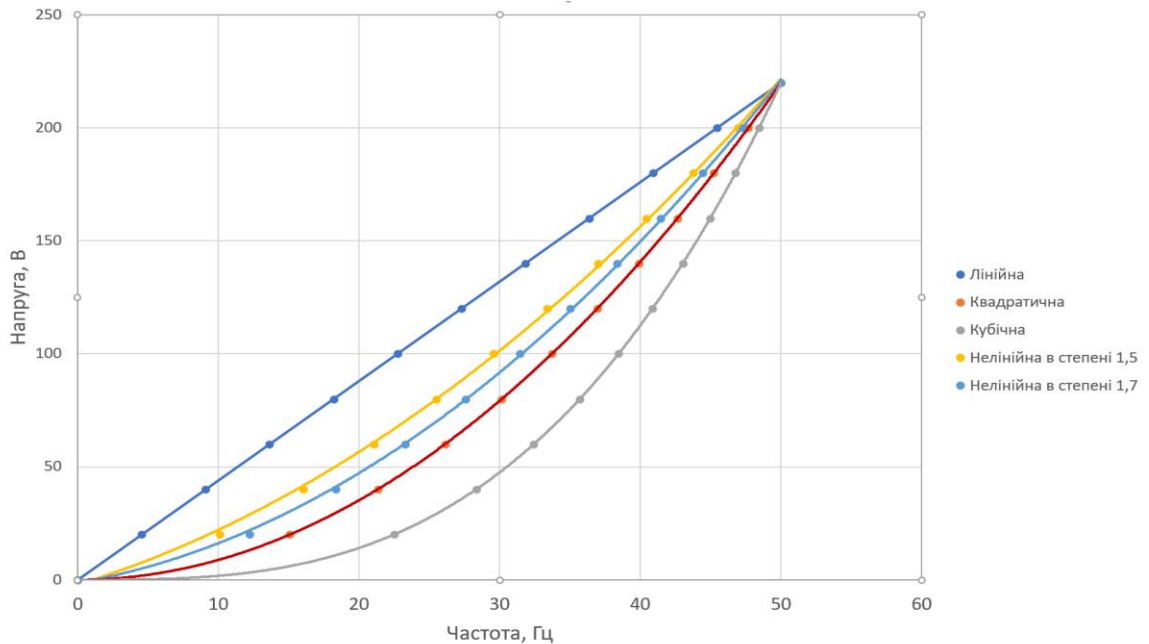


Рисунок 1.12 - Графіки залежностей $U = F(f)$ стандартних законів керування перетворювачами частоти

Правила управління ШІМ-перетворювачами, які представлені на рисунку 1.12, призначені для керування різними електродвигунами і розраховані на конкретні значення $U(f)$. Якщо необхідно налаштувати закон керування з боку користувача, це можливо зробити для певної кількості значень $U(f)$. Для енергозбереження необхідно розробити і обґрунтувати адаптивний метод управління ШІМ-перетворювачем, який має здатність автоматично адаптуватися для досягнення мінімального споживання електроенергії.

Недоліки сучасних ШІМ-перетворювачів зі скалярним керуванням для електроприводів насосів:

1) фіксоване число стандартних алгоритмів управління частотою і напругою $U/f^n = const$

2) обмеженість закону управління, який формується користувачем, виражається у використанні лише 3-5 точок для задання значень напруги і частоти в рамках $U/f^n = const$;

3) неможливість адаптації параметрів напруги та частоти ускладнює можливість досягнення оптимального споживання електроенергії та підтримки сталого тиску в системі водопостачання..

Для виправлення недоліків було проведено розрахунки енергоспоживання, представлені добовим графіком на рисунку 1.13. На основі цих розрахунків була визначена оптимальна кількість ступенів регулювання частоти обертання асинхронного електропривода для забезпечення ефективного енергозбереження, як показано на тому ж рисунку 1.13

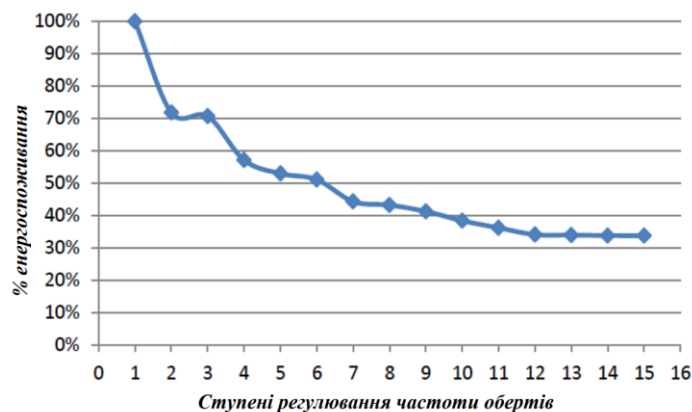


Рисунок 1.13 - Залежність енергоспоживання від кількості ступенів регулювання

З аналізу графіка на рисунку 1.13 можна зробити висновок, що оптимальним є використання 10-12 ступенів регулювання. Однак, на жаль, сучасні ШІМ-перетворювачі не забезпечують таку кількість ступенів регулювання. Тому для досягнення оптимального рівня енергозбереження необхідно впровадження індивідуального закону управління для кожного насосного агрегату, який відрізняється від стандартних підходів.

1.4 Цілі та завдання дослідження

Вивчаючи різні системи водопостачання, можна прийти до висновку, що прямоточна система водопостачання є найбільш оптимальною з точки зору енергозбереження, оскільки в ній тиск у трубопроводі підтримується самим

електроприводом насосного агрегату, а додаткова ємність виконує функцію пожежного резервуара.

Виявлено, що з усіх можливих методів регулювання найбільш відповідним є ШІМ-регулювання, яке дозволяє змінювати частоту і напругу мережі, досягаючи максимального енергозбереження. Аналіз методів управління перетворювачами частоти показав, що найпростішими і найбільш економічним для електроприводу насосу є скалярні закони керування перетворювачами частоти.

У скалярних законах управління, що використовуються в перетворювачах частоти, відсутність гнучкості щодо регулювання частоти та напруги під різними режимами роботи насосного агрегату призводить до непродуктивного витрачання електроенергії. Для підвищення енергоефективності необхідно розробити алгоритм управління перетворювачем частоти, який би автоматично регулював напругу і частоту в таким чином, щоб забезпечити максимальну економію електроенергії. Для досягнення цієї мети було сформульовано наступні завдання дослідження:

1. Розробити математичну модель регулювання частоти обертів електроприводу насосних агрегатів, використовуючи технологію ШІМ-перетворювачів.

2. Проаналізувати метод регулювання частоти обертання електропривода, спрямований на максимальне зниження витрат електроенергії приводною системою.

3. Обґрунтувати структуру системи управління ШІМ-перетворювачем для регулювання обертової частоти насосних агрегатів з підтриманням сталого тиску.

4. Провести експериментальні дослідження адаптивного методу управління частотою перетворювача.

5. Сформулювати комплекс необхідних дій для безпечного використання електроприводу насосів у системі водопостачання тваринницького комплексу.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Постановка завдання щодо зниження споживання електроенергії насосами системи водопостачання

Адаптивний метод керування частотним перетворювачем має забезпечити скорочення витрат електроенергії електроприводом насосу.

Цільову функцію завдання скорочення споживання електроенергії можна сформулювати наступним чином:

$$I_{\text{ЕД}} = f(U, f) \rightarrow \min \quad (2.1)$$

$I_{\text{ЕД}}$ – фазний струм електродвигуна, А;

U – фазна напруга, В;

f – частота мережі живлення, Гц; Граничні умови:

$$U \leq U_{\text{н}} ;$$

$$f \leq f_{\text{н}} .$$

Коефіцієнт корисної дії НА:

$$\eta_{\text{АГ}} = \eta_{\text{ПЧ}} \cdot \eta_{\text{ЕД}} \cdot \eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{Т}} \rightarrow \max \quad (2.2)$$

де: $\eta_{\text{ПЧ}}$, $\eta_{\text{ЕД}}$, $\eta_{\text{Н}}$, $\eta_{\text{Т}}$ – відповідно ККД перетворювача частоти, електродвигуна, насоса, трубопроводу.

ККД стандартних ПЧ становить 0,95...0,98%. На ефективність насосної установки можуть вплинути тільки способи регулювання, які змінюють її характеристики. На ККД магістралі можна впливати лише дроселюванням, але цей спосіб приводить до збільшення гідравлічних втрат. Отже, одним зі способів розв'язання проблеми зменшення споживання електроенергії електроприводом насосного обладнання є підвищення ефективності електродвигуна [10].

ККД асинхронного електродвигуна розраховується за формулою:

$$\eta_{\text{ЕД}} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.3)$$

де P_1 – споживана потужність;

P_2 – корисна потужність

$$P_2 = P_1 \cdot \left(0,995 - \frac{n_1 - n_2}{n_1}\right) - 1,22I_1^2 R_{1\phi} \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1}\right) - P_{ст} \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1}\right) - P_{мех}, \quad (2.4)$$

де n_1 – синхронна частота обертання, хв–1 ;

n_2 – частота обертання ротора, хв–1;

I_1 – лінійний струм обмотки статора, А;

$R_{1\phi}$ – опір фазної обмотки Ом.

Отже величина струму фази статора впливає на ККД електродвигуна.

Для аналізу впливу величини фазного струму статора на ефективність приводу електродвигуна насосного агрегату була розроблена структурна схема автоматичного керування зі зворотнім зв'язком за тиском (рисунок 2.1) [7].

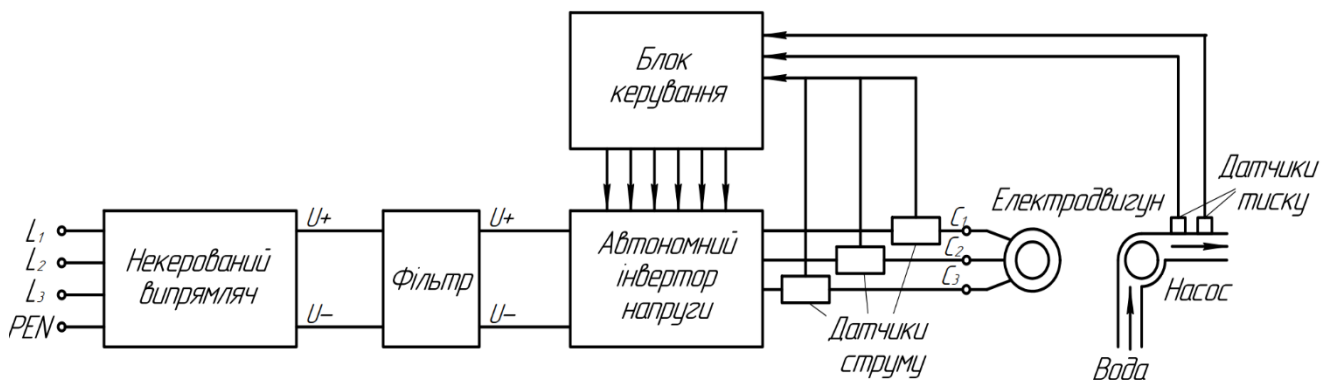


Рисунок 2.1 – Структурна схема регульованого електроприводу насосного агрегату

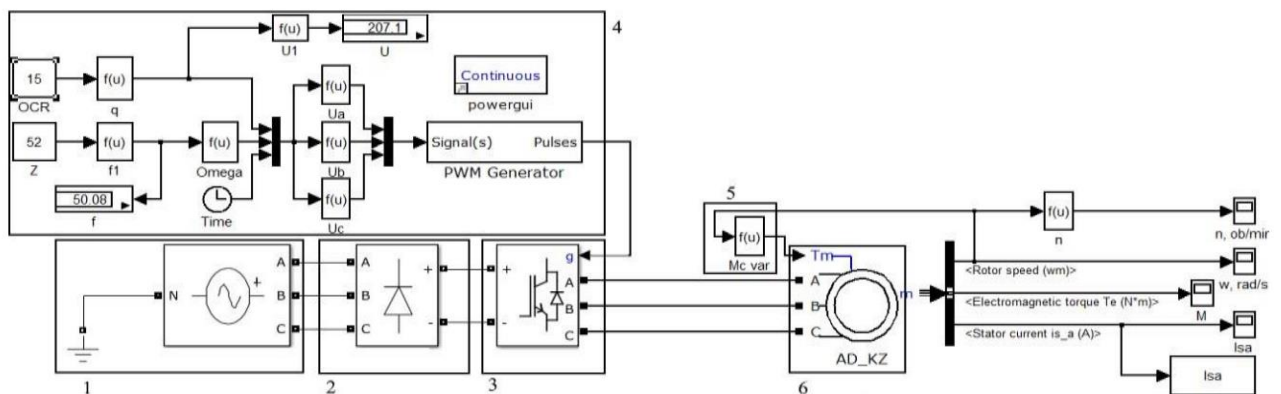
Трифазна напруга подається на некерований випрямляч та згладжується фільтром, подається на автономний інвертор напруги. Система керування автономного інвертора генерує трифазну симетричну ШІМ. Вихідна напруга автономного інвертора подається на асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Датчики струму встановлені для моніторингу фазного струму електродвигуна. У разі зміни тиску в трубопроводі через зворотний зв'язок сигнал з датчика тиску подається в систему керування АІН, і алгоритм ШІМ-

перетворювача регулює частоту так, щоб тиск у системі водопостачання був стабільним [11].

Одним з методів підвищення енергоефективності електричного двигуна є розробка адаптивного методу керування ПЧ, який буде налаштований на управління електродвигуном з мінімальним споживанням енергії. Для перевірки цього припущення необхідно створити комп'ютерну модель у системі MatLab v.23.2 і на основі її результатів розробити адаптивний метод управління ШІМ–перетворювачем [2].

2.2. Математична модель системи "асинхронний електропривод – перетворювач частоти"

Комп'ютерна модель представлена на рисунку 2.2.



1– трифазна система напруг; 2 –випрямляч; 3 – автономний інвертор напруги; 4 – система управління автономного інвертора напруги;

5 – відцентровий насос; 6 – АД із короткозамкненим ротором

Рисунок 2.2 – Математична модель системи " ПЧ – АД – насос"

Кожна підсистема на рисунку 2.2 описується такими математичними рівняннями:

1. Трифазна система напруг

$$\begin{cases} U_A = q \cdot U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ U_B = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right), \\ U_C = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.5)$$

Де U_m – амплітудне значення напруги, В;

ω – кутова швидкість обертання, с^{-1} .

2. Випрямляч напруги:

Середня випрямлена напруга:

$$U_d = 2,34 \cdot U_0, \quad (2.6)$$

де U_0 – фазна напруга вторинної обмотки трансформатора.

Середній випрямлений струм:

$$I_d = \frac{U_d}{R_H}, \quad (2.7)$$

де R_H – номінальний опір навантаження.

3. Систему керування АІ можна описати так:

вихідна напруга фази А за 6–зонної ШІМ описується так:

$$\begin{cases} \frac{1}{3} U_{\Pi}, 0 \leq t \leq \frac{T}{6} \\ \frac{2}{3} U_{\Pi}, \frac{T}{6} < t \leq \frac{T}{3} \\ \frac{1}{3} U_{\Pi}, \frac{T}{3} < t \leq \frac{T}{2} \\ -\frac{1}{3} U_{\Pi}, \frac{T}{2} < t \leq \frac{2T}{3} \\ -\frac{2}{3} U_{\Pi}, \frac{2T}{3} < t \leq \frac{5T}{6} \\ -\frac{1}{3} U_{\Pi}, \frac{5T}{6} < t \leq T \end{cases} \quad (2.8)$$

генератор трифазної синусоїди описується так

$$\begin{cases} U_A = q \cdot U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ U_B = q \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right), \\ U_C = q \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.9)$$

де q – коефіцієнт заповнення імпульсів

Вихідна частота сигналу, генерованого ШІМ, розраховується по формулою:

$$f = \frac{F_{clk}}{N \cdot 512 \cdot Z}, \quad (2.10)$$

де F_{clk} – тактова частота мікроконтролера (кварцового резонатора);

Z – кількість імпульсів;

N – число ключів інвертора.

У цій математичній моделі зменшення фазного струму досягається шляхом встановлення коефіцієнта заповнення, при заданій кількості імпульсів. Тоді як стабілізація тиску досягається шляхом встановлення кількості імпульсів.

4. АД із короткозамкненим ротором:

Рівняння математичної моделі АД запишемо в системі d–q у такому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{qs} \\ V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \varphi_{qs} \\ V'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d\psi_{qr'}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{dr} \\ V'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d\psi_{dr'}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{qr} \\ T_e = 1,5 \cdot p \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{ds} - \psi_{qs} \cdot i_{qs}) \end{array} \right. , \quad (2.11)$$

Де $\psi_{qs} = L_s + i_{qs} + L_m + i'_{qr}$ – проекція потокозчеплення статора на вісь q;

$\psi_{ds} = L_s + i_{ds} + L_m + i'_{dr}$ – проекція потокозчеплення статора на вісь d;

$\psi'_{qr} = L'_s + i'_{qr} + L_m + i_{qs}$ – проекція приведенного потокозчеплення ротора на вісь q;

$\psi'_{dr} = L'_r + i'_{dr} + L_m + i_{ds}$ – проекція приведенного потокозчеплення ротора на вісь d;

$L_s = L_{1s} + L_m$ – індуктивність статора;

$L'_r = L'_{1r} + L_m$ – приведена індуктивність ротора.

Момент двигуна визначається за формулою Клосса

$$M_d = \frac{M_k \cdot (2 + q)}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k} + q}, \quad (2.12)$$

де M_k – критичний момент, Н·м;

S – ковзання;

S_k – критичне ковзання.

Критичне ковзання:

$$M_k = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (2.13)$$

де r_1 – активний опір статора;

r_2 – приведений активний опір ротора, Ом;

x_k – індуктивний опір статора.

Критичний момент:

$$M_k = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega \cdot (\sqrt{r_2^2 + x_k^2} + r_2)}, \text{ Н} \cdot \text{ м} \quad (2.14)$$

де U_ϕ – фазна напруга, В;

ω – кутова частота обертання ротора електродвигуна, рад/с.

$$q = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (2.15)$$

Струм АД:

$$I = \sqrt{\frac{U^2 \cdot 1,2}{\left(r_1 + \frac{r_2}{S}\right)^2 + x_k^2}}, \quad (2.16)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення розраховуються за такими за такими формулами:

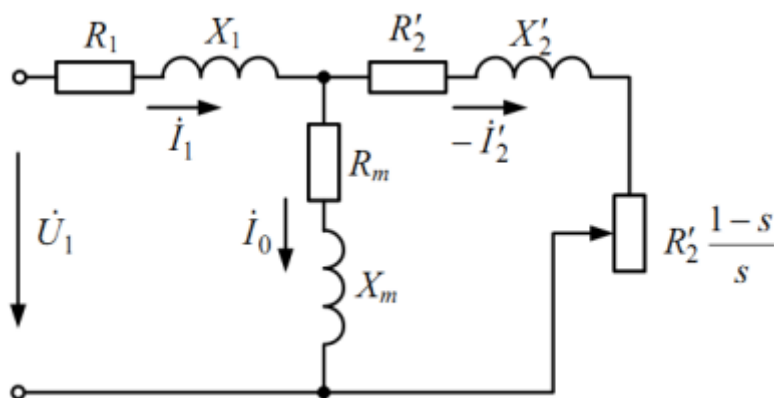


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення АД

Кутова швидкість обертання магнітного поля:

$$\omega_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}, \text{ рад/с} \quad (2.17)$$

де f_1 – частота мережі, Гц;

p – число полюсів.

Номінальна кутова швидкість ротора:

$$S_H = \frac{\omega_o - \omega_H}{\omega_o}, \quad (2.18)$$

де ω_H – номінальна кутова частота обертання ротора електродвигуна,

$$\omega_H = \omega_o \cdot (1 - S_H), \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.19)$$

Номінальний момент асинхронного двигуна:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.20)$$

Номінальний струм асинхронного двигуна:

$$I_{H.\phi.} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{H.\phi.} \cdot \cos\varphi_n}, \text{ А} \quad (2.21)$$

де $U_{H.\phi.}$ – номінальна фазова напруга, В;

$\cos\varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності.

Споживана потужність асинхронного двигуна:

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta_H} \quad (2.22)$$

де P_H – номінальна активна потужність, Вт;

η_H – номінальний ККД електродвигуна

Номінальний опір електричного двигуна:

$$Z_H = \frac{U_{H.\phi.}}{I_{H.\phi.}}, \quad (2.23)$$

де $I_{H.\phi.}$ – номінальний фазовий струм, А.

Для перерахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна а з відносних одиниць в абсолютні використаємо такі формули:

– активний опір обмотки статора, Ом:

$$R_s = R_s^* \cdot Z_H, \quad (2.24)$$

де R_s^* – активний опір обмотки статора.

Z – індуктивний опір розсіювання обмотки статора, Ом

$$X_s = X_s^* \cdot Z_H, \quad (2.25)$$

Де X_s^* – активний опір обмотки статора.

– приведений активний опір обмотки ротора, Ом

$$R_r' = R_r^{*'} \cdot Z_H, \quad (2.26)$$

де $R_r^{*'}$ – активний опір обмотки ротора.

– приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, Ом

$$X_r' = X_r^{*'} \cdot Z_H, \quad (2.27)$$

де $X_r^{*'}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки ротора.

– індуктивний опір ланцюга намагнічування, Ом

$$X_\mu' = X_\mu^* \cdot Z_H, \quad (2.28)$$

де X_μ^* – індуктивний опір ланцюга намагнічування.

– власна індуктивність статора

$$L_{\sigma s} = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f_1}, \text{ Гн} \quad (2.29)$$

– власна індуктивність ротора

$$L_{\sigma r} = \frac{X_r'}{2 \cdot \pi \cdot f_1}, \text{ Гн} \quad (2.30)$$

– взаємна індуктивність

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_1}, \text{ Гн} \quad (2.31)$$

– індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_m + L_{\sigma s}, \quad (2.32)$$

– індуктивність обмотки ротора

$$L_1 = L_m + L_{\sigma r}, \quad (2.33)$$

5. Відцентровий насос моделюється через теоретичний та експериментальний момент опору насоса $M_{c, \text{теор}}$ і $M_{c, \text{експер}}$:

$$M_{c \text{ теор}} = M_{cн} + (M_H - M_{cн}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2, \text{ Н} \cdot \text{ м}, \quad (2.34)$$

$$M_{cн} = 0,3 \cdot M_H, \text{ Н} \cdot \text{ м}, \quad (2.35)$$

$$M_{c \text{ експер}} = 7 \cdot 10^{-10} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,029 \cdot n - 1,011, \text{ Н} \cdot \text{ м} \quad (2.36)$$

де M_H – номінальний момент опору, Н·м;

ω_H – номінальна кутова частота обертання АД, с⁻¹;

ω – кутова частота обертання електродвигуна, с⁻¹.

n – частота обертання ротора електродвигуна, об/хв.

Зворотний зв'язок за тиском математично описується такими рівняннями:

– з Q - H характеристики для насоса 1,5К-6 ТНП-061

$$H = -0,039 \cdot Q^3 + 0,0302 \cdot Q^2 - 0,2308 \cdot Q + 19,907, \text{ м} \quad (2.37)$$

– використовуючи співвідношення між напором і частотою обертання:

$$\frac{Q}{Q_H} = \frac{n}{n_H} \Rightarrow Q = \frac{Q_H}{n_H} \cdot n, \quad (2.38)$$

– визначаємо залежність $H = f(n)$:

$$H = -0,039 \cdot \frac{Q_H^3}{n_H^3} \cdot n^3 + 0,0302 \cdot \frac{Q_H^2}{n_H^2} \cdot n^2 - 0,2308 \cdot Q + 19,907, \text{ м} \quad (2.39)$$

Якщо величина напору буде постійною, то можна визначити частоту обертання, яку має розвивати електропривод, а також ковзання:

$$S = \frac{n_o - n_H}{n_o}, \quad (2.40)$$

- за розрахованою величиною ковзання визначаємо струм (2.16) і момент (2.13) АД.

За матрицею U і f лінійного закону керування $U / f = const$, що використовується для старту електродвигуна, для обчисленого значення f визначається U і вводиться у формулу обчислення струму електродвигуна і моменту. Потім, для виявлення точки мінімального значення струму, при якій насосна установка подаватиме воду в систему водопостачання із встановленим тиском, система автоматично буде знижувати напругу на один рівень при сталій частоті та обчислить струм електродвигуна. У разі його зменшення, система буде

продовжувати знижувати на рівень, поки струм не почне збільшуватися. Після цього система повернеться до попереднього значення напруги при цій частоті і продовжить роботу, забезпечуючи необхідний тиск у системі водопостачання.

Оскільки розв'язання рівнянь математичної моделі перетворювача частоти спільно з асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором і відцентровим насосом аналітично є трудомістким завданням, необхідно розробити комп'ютерну модель для перевірки сформульованої гіпотези [7].

2.3 Створення та обчислення параметрів комп'ютерної моделі системи управління частотним перетворювачем для асинхронного електроприводу насоса

Використовуючи гіпотезу та математичну модель, була створена комп'ютерна модель системи "автономний інвертор напруги – асинхронний електродвигун з КЗ ротором – відцентровий насос" в системі MatLab v23.2. Задаючі змінні для цієї моделі включають OCR (напруга) і f (частота), які виходять з формувача ШІМ-імпульсів перетворювача частоти. Дані струму статора передаються в робочу область для статистичної обробки, після чого визначається максимальне значення струму статора, а потім змінюються вхідні параметри. Коли струм статора збільшується, коефіцієнт заповнення імпульсів змінюється щоб досягнути мінімального значення величини струму. Це дозволяє вибирати енергоефективні режими для будь-якого насоса і зберігати закони регулювання перетворювача частоти.

У результаті комп'ютерного моделювання необхідно вирішити такі завдання:

1) Отримати графіки струму статора фази А, електромагнітного моменту, частоти обертання в залежності від часу;

2) Перевірити гіпотезу про зниження кількості споживаної електроенергії.

Вхідні параметри моделі:

– коефіцієнт заповнення імпульсів;

– число імпульсів – $Z(f)$.

Вихідні параметри моделі: частота обертання, момент, струм статора фази А.

Модельована машина – АД із КЗ ротором типу АІР 80А2.

Довідкові данні [4]:

Синхронна частота обертання: $n_H = 2880$ об/хв

Номінальна потужність: $P_H = 1,5$ кВт

Номінальний коефіцієнт потужності: $\cos\varphi_H = 0,85$

Кількість пар полюсів: $p = 1$

Номінальний ККД $\eta_H = 0,82$

Номінальна частота: $f_1 = 50$ Гц

Номінальна фазна напруга: $U_{н.ф.} = 220$ В

Момент інерції ротора: $J_{д.р.} = 0,018$ кг·м

Номінальне ковзання: $S_H = 0,046$

Параметри Т-подібної схеми заміщення двигуна:

Індуктивний опір магнітного кола: $X_\mu = 2,5$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора: $X_S = 0,051$

Активний опір обмотки статора: $R_S = 0,084$

Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора: $X_r' = 0,081$

Приведений активний опір обмотки ротора: $R_r' = 0,049$

Кутова швидкість обертання магнітного поля:

$$\omega_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальна кутова швидкість ротора:

$$S_H = \frac{\omega_o - \omega_H}{\omega_o}$$

де $\omega_H = \omega_o \cdot (1 - S_H) = 314(1 - 0,046)$ рад/с

Номінальний момент електродвигуна:

$$M_H = \frac{P_H}{M_\omega} = \frac{1500}{314} = 5,005 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Споживана потужність електродвигуна:

$$P_1 = \frac{R_s}{\eta_n} = \frac{1500}{0,82} = 1,83 \text{ кВт}$$

$$I_{н.ф.} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{н.ф.} \cdot \cos\varphi_n} = \frac{1830}{3 \cdot 220 \cdot 0,85} = 3,26 \text{ А}$$

Номинальний опір електродвигуна:

$$Z_n = \frac{U_{н.ф.}}{I_{н.ф.}} = \frac{220}{3,26} = 67,47 \text{ Ом}$$

Перерахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення АД з відносних одиниць в абсолютні.

Приведений активний опір обмотки ротора:

$$R_r' = 0,049 \cdot 67,47 = 3,31 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_s = 0,084 \cdot 67,47 = 5,67 \text{ Ом}$$

Власна індуктивність ротора:

$$L_{\sigma r} = \frac{X_r'}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,049 \cdot 67,47}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,017 \text{ Гн}$$

Власна індуктивність статора:

$$L_{\sigma s} = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,051 \cdot 67,47}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,011 \text{ Гн}$$

Взаємна індуктивність:

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{2,5 \cdot 67,47}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,537 \text{ Гн}$$

Індуктивність обмотки статора:

$$L_1 = L_m + L_{\sigma s} = 0,537 + 0,011 = 0,548 \text{ Гн}$$

Індуктивність обмотки ротора за:

$$L_1 = L_m + L_{\sigma r} = 0,537 + 0,017 = 0,554 \text{ Гн}$$

2.4 Симуляція процесів оптимізації споживання струму за допомогою комп'ютерної моделі.

Для перевірки гіпотези про зниження споживання електричної енергії статора під час регулювання напруги мережі, була створена комп'ютерна модель в системі MatLab/Simulink v23.3 (див. рисунок 2.3). Модель включала в себе автономний інвертор напруги, формувач імпульсів, формувач трифазної напруги, та регулятор величини напруги і частоти мережі. Вона також включала в себе електродвигун, сполучений з відцентровим насосом. Час моделювання - 0,35 секунди, що достатньо для переходу електродвигуна з пускового в робочий режим.

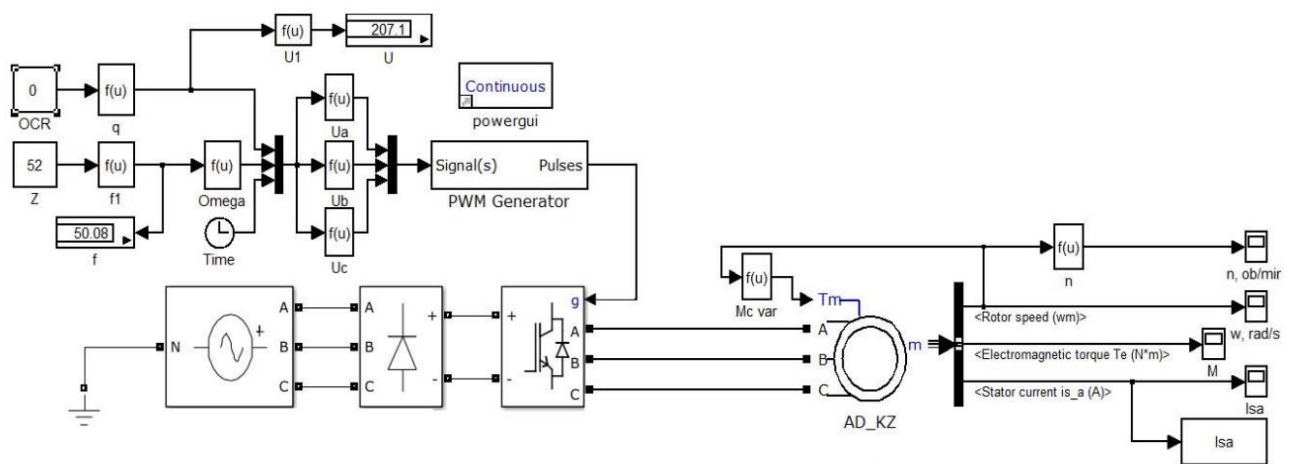


Рисунок 2.4 – Комп'ютерна модель системи, розроблена в програмному середовищі Simulink, для регулювання напруги живлення електродвигуна.

У результаті симуляції було отримано залежності електромагнітного моменту, частоти обертання, і струму фази А (рисунки 2.5 – 2.7) за величин фазової напруги $U=220$ В і частоти мережі $f=50$ Гц

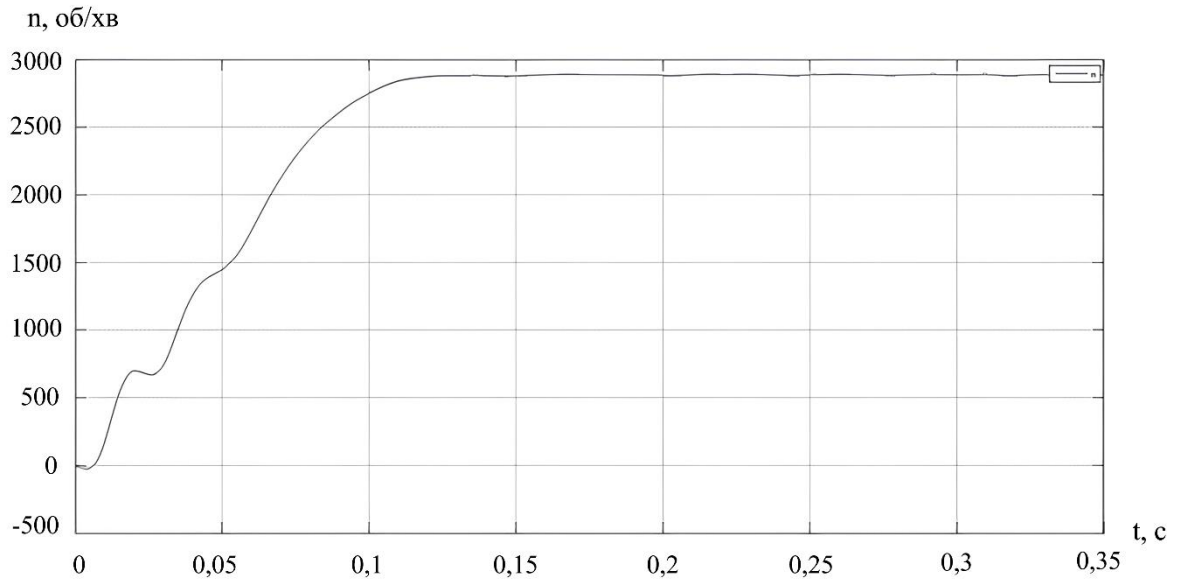


Рисунок 2.5 – Графік залежності частоти обертання в залежності від часу до регулювання напруги

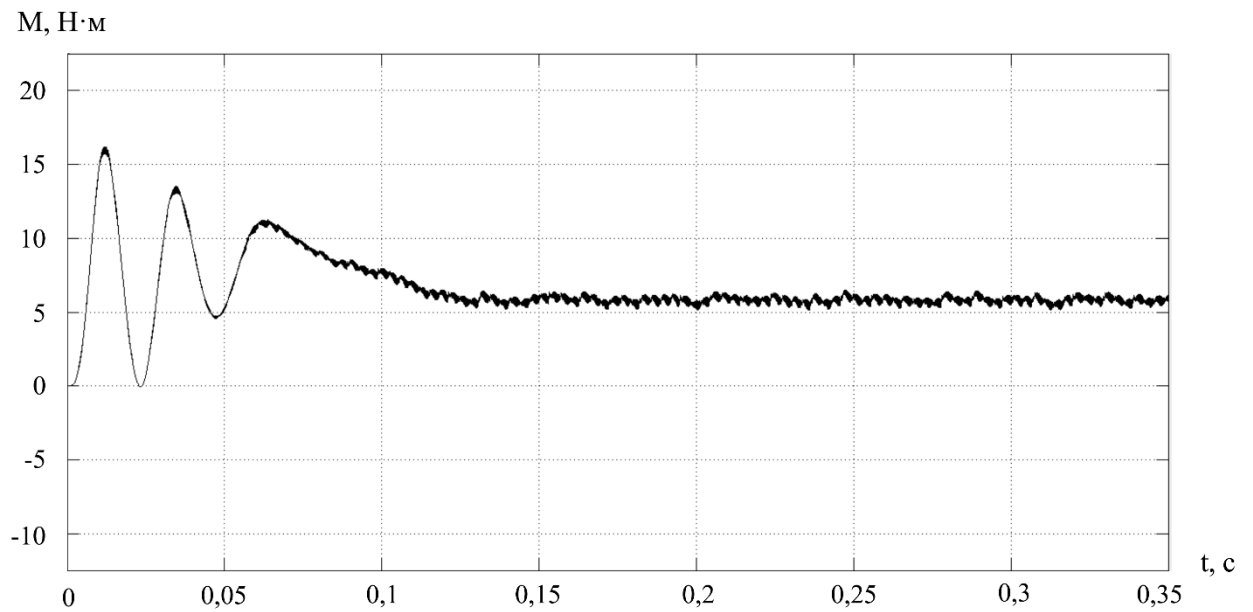


Рисунок 2.6 – Графік залежності електромагнітного моменту від часу до регулювання напруги

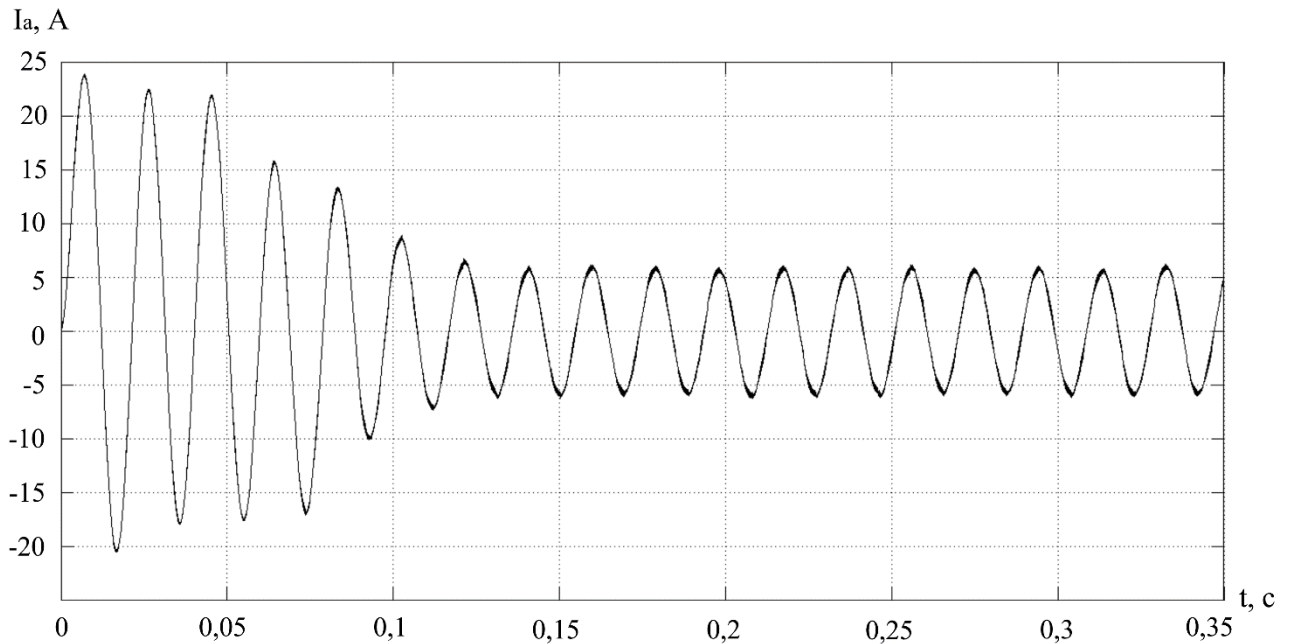


Рисунок 2.7 – Графік зміни струму статора в залежності від часу

Аналіз залежностей (2.5), (2.6) і (2.7) вказує, що стартовий процес триває приблизно 0,13 секунди, при цьому стартовий струм досягає 23,8445 А.

Максимальне значення струму статора фази А становить 23,8448 А, а мінімальне значення -20,5547 А (див. рисунок 2.7).

Була розроблена модель для ситуації з регулюванням величини фазової напруги (див. рисунок 2.8).

Аналіз отриманих залежностей (див. рисунок 2.9, 2.10) дозволяє зробити висновок, що час прискорення електродвигуна та електромагнітний момент не змінюються в порівнянні з попереднім моделюванням (див. рисунок 2.4, 2.5).

Отже, можна стверджувати, що регулювання напруги не впливає на час запуску АД, частоту обертання та величину електромагнітного моменту.

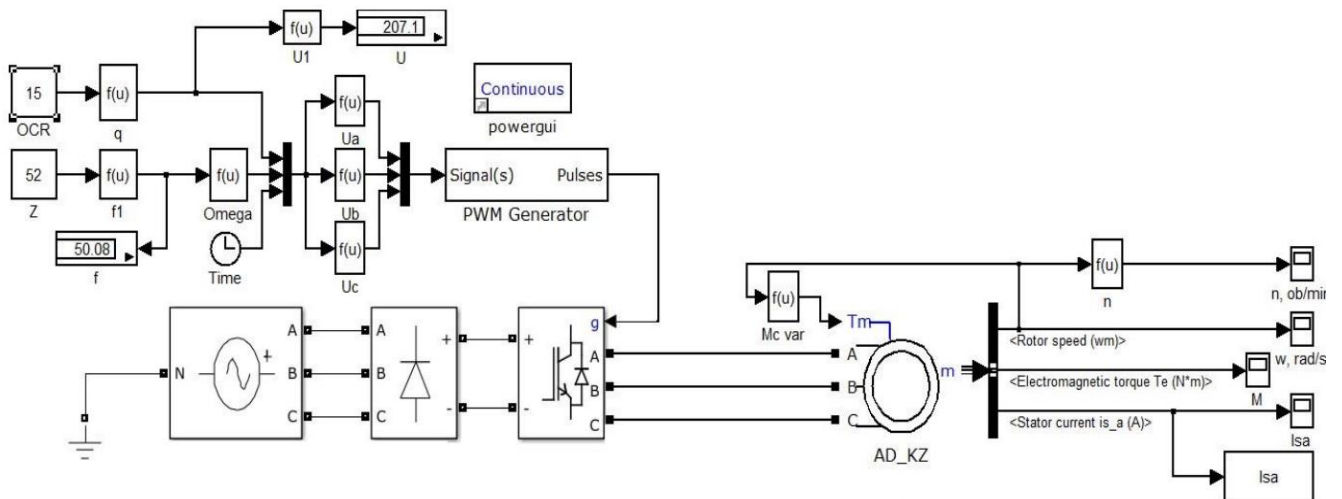


Рисунок 2.8 – Комп'ютерна модель системи, розроблена в програмному середовищі Simulink після зміни напруги живлення АД

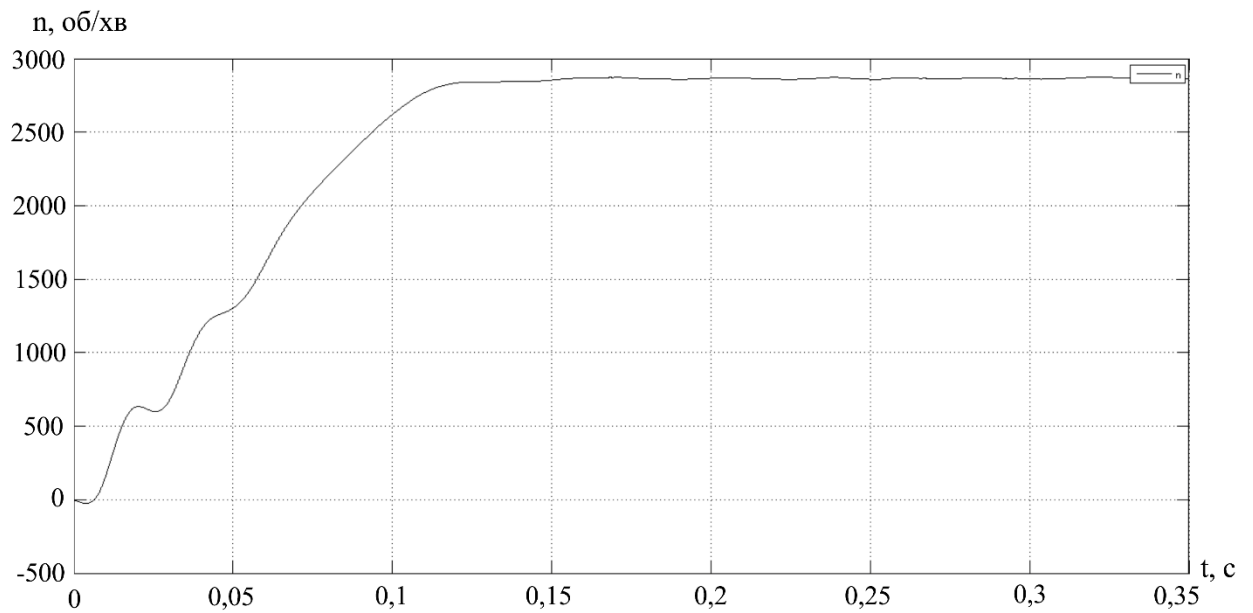


Рисунок 2.9 – Графік частоти обертання від в залежності від часу після зміни величини напруги

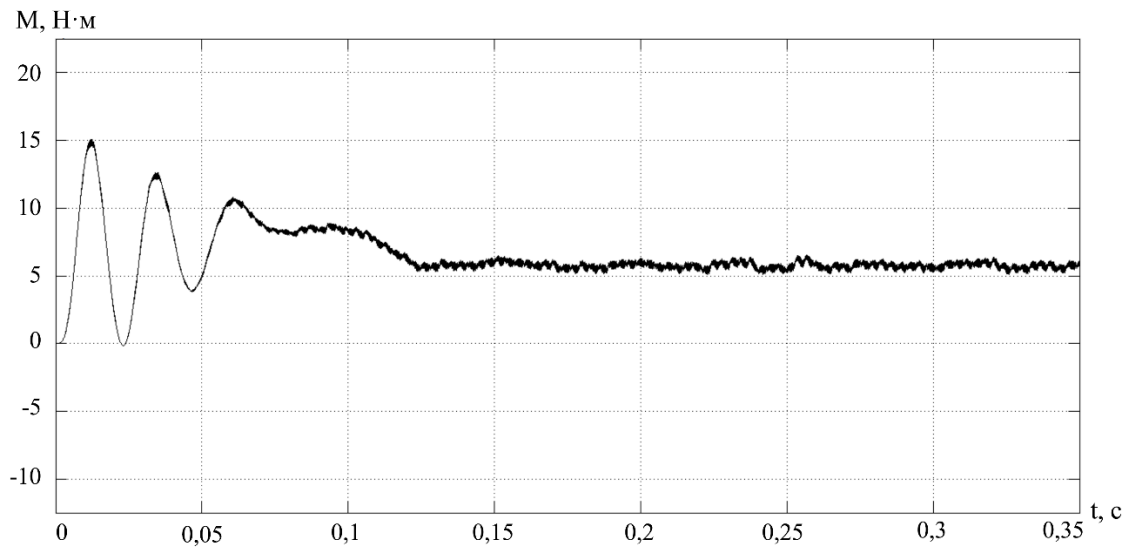


Рисунок 2.10 – Графік електромагнітного моменту в залежності від часу після регулювання величини напруги

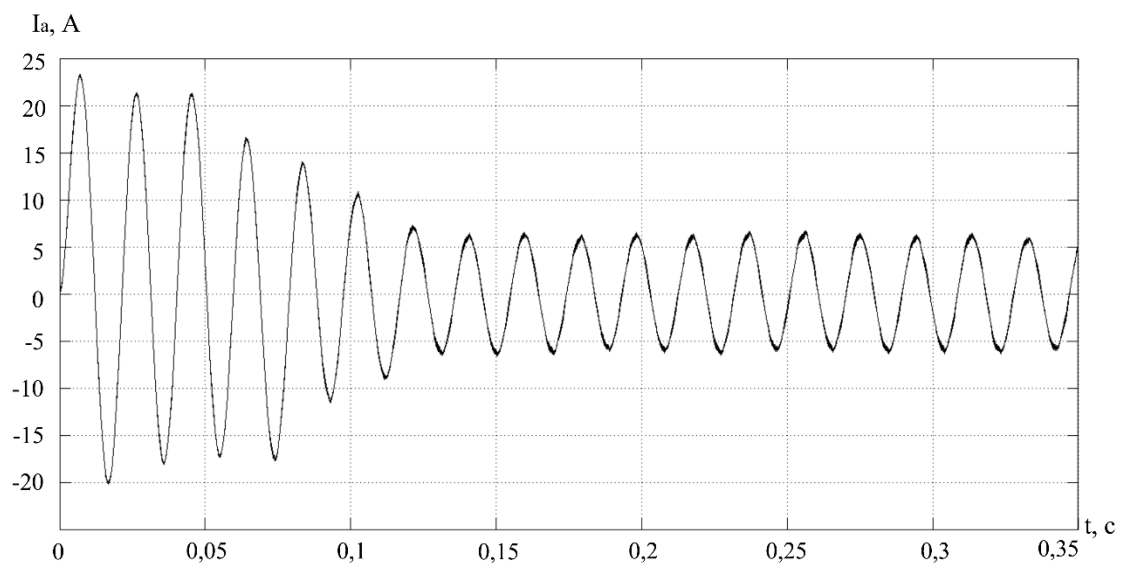


Рисунок 2.11 – Графік струму статора фази А від в залежності часу після регулювання величини напруги

Після регулювання напруги при частоті 50 Гц, максимальне значення струму статора фази А під час запуску електродвигуна становить 23,2578 А, а мінімальне значення - 20,1995 А (див. рисунок 2.10).

Комп'ютерна модель підтверджує гіпотезу, що можливо досягнути зниження споживання електроенергії шляхом регулювання напруги живлення в скалярних системах перетворювачів частоти при сталій частоті мережі. При цьому енергетичні характеристики залишаються незмінними, а струм зменшується на 3%, що свідчить про економію електроенергії.

2.4 Метод адаптивного управління перетворювачем частоти для системи прямого водопостачання

Щоб скоротити використання електричної енергії, потрібно створити метод управління ШІМ-перетворювачем, який би автоматично вибирав параметри для керування мережею, що живить електромотор, спрямовані на скорочення використання електричної енергії та покращення характеристик електроприводу. Для вирішення цієї проблеми було розроблено адаптивний метод управління ШІМ-перетворювачем, який автономно адаптується до мінімального споживання енергії насосним устаткуванням. Зворотній зв'язок за тиском виконує функцію давача параметрів напруги і частоти живильної мережі системи управління силовими ключами. На рисунку 2.12 представлено блок-схему адаптивного алгоритму управління.

Основа роботи алгоритму, що відображений на рисунку 2.12, полягає в автоматичному виявленні найменшого значення струму та стабільного тиску, що корелює з найнижчим споживанням електроенергії. На старті роботи алгоритму в блок 2 вводяться такі сталі величини, які задаються електротехнічними спеціалістами, які налаштовують ШІМ-перетворювач, а саме: початкова, кінцева величина коефіцієнта заповнення імпульсів (q) та його крок, час затримки, що враховує інерційність цієї системи (A). Коефіцієнт q відповідний амплітуді напруги на виході ШІМ-перетворювача, що живить електродвигун, а кількість імпульсів (z) відповідає частоті вихідного струму ШІМ-перетворювача. У блоку 3 перевіряється кнопка "Пуск" - S_{B1} ($S_{B1} = 1?$). За умови $S_{B1} = 1$. робота алгоритму переходить до запуску підпрограми плавного пуску електродвигуна

за лінійним законом керування ШІМ-перетворювачем (блок 4). У разі невиконання умови робота алгоритму переходить на перевірку умови натискання кнопки S_{B1} .

У блоку 5 проводиться опитування датчика мінімального тиску S_{P1} (тиск порівнюється з заданим).

У блоку 6 ініціюється лічильник $S1$ з початковим значенням $S_{1H} = 0$.

У блоку 7 перевіряється умова, чи замкнутий датчик ($S_{P1} = 1$). Якщо $SP1$ не дорівнює 1, то у блоку 8 відбувається збільшення q і зменшення z на один встановлений крок. Потім алгоритм передає контроль до блоку 12, де проводиться перевірка значення A . Якщо в умові S_{1T} не дорівнює A , то у блоку 13 відбувається збільшення S_{1T} на одиницю, а потім алгоритм повертається до блоку 7.

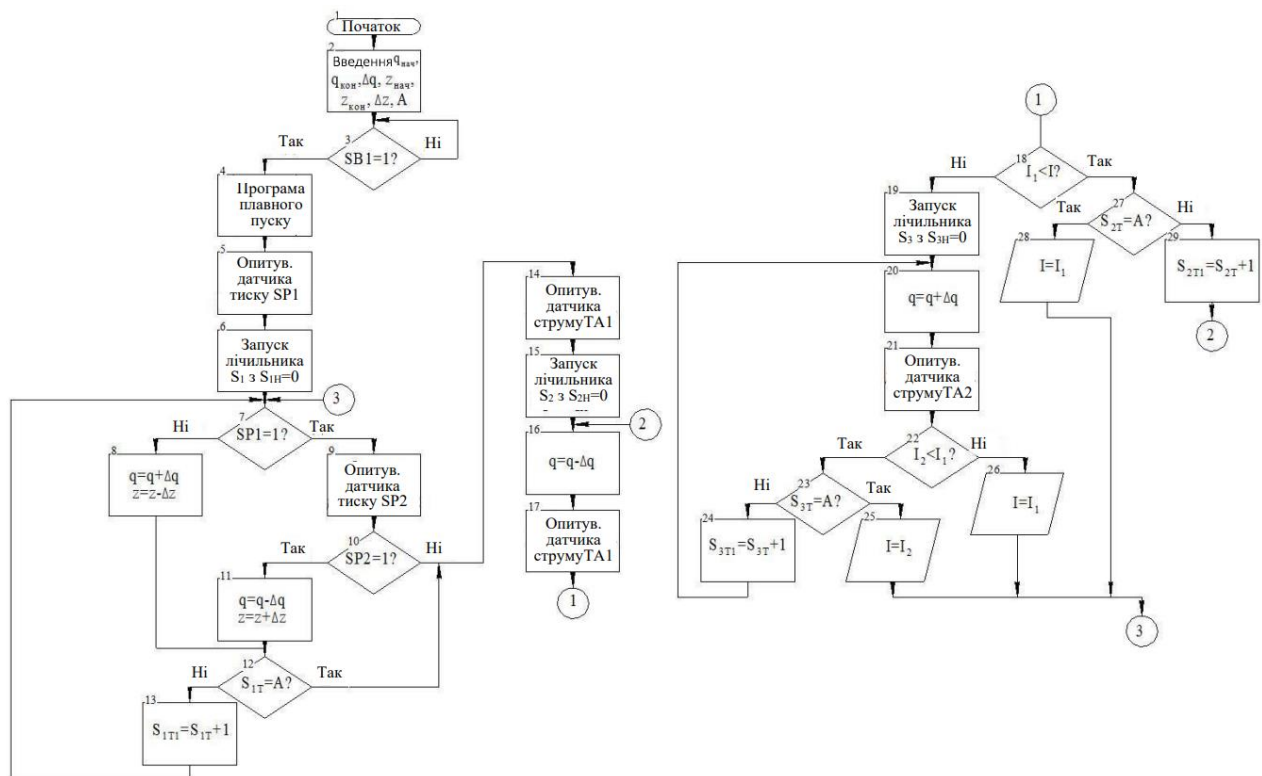


Рис. 2.12 – Блок-схема адаптивного алгоритму управління частотним перетворювачем

Якщо $S_{P1} = 1$, то проводиться опитування датчика максимального тиску S_{P2} . Якщо $S_{P2} = 1$, то в блоку 11 відбувається зменшення q і збільшення z на один крок. Потім алгоритм переходить до блоку 12, де проводиться порівняння значення лічильника з A .

Якщо S_{P2} не дорівнює одиниці, то алгоритм переводить роботу програми до блоку 14, проводиться опитування датчика струму T_{A1} , і отримується фіксоване значення фазного струму – I .

У блоку 15 запускається лічильник S_2 з початковим значенням $S_{2H} = 0$. У блоку 16 зменшується q на один крок. У блоку 17 проводиться опитування датчика струму T_{A1} , в результаті чого отримується фіксоване значення струму I_1 . У блоку 18 проводиться порівняння I_1 з попереднім значенням I .

Якщо значення лічильника S_{2T} не збігається зі значенням A , то в блоку 29 збільшується S_{2T} на одиницю і програма повертається до блоку 16, а якщо значення S_{2T} дорівнює A , параметри q та z залишаються такими самими. Після цього електродвигун працює з цими параметрами за найменшого струму I_1 .

Якщо струм I_2 більший за I , то в блоку 19 запускається лічильник S_3 з початковим значенням $S_{3H} = 0$. У блоку 20 збільшується q на один крок. У блоку 21 проводиться опитування датчика струму T_{A1} , і в підсумку виходить фіксоване значення струму I_2 .

Якщо значення струму I_2 менше за I_1 , то в блоку 23 проводиться порівняння значення S_{3T} з A . Якщо значення S_{3T} не дорівнює A , то в блоку 24 збільшується S_{3T} на одиницю і повертається до блоку 20, а якщо значення лічильника S_{3T} дорівнює A , параметри q і z залишаються без зміни. Після цього електродвигун працює з енергозберігаючими параметрами за найменшого струму I_1 .

Опитування датчика тиску і струму в системі водопостачання виконується при подальших змінах тиску у трубопроводі, після чого розпочинається новий пошук значень енергоефективних параметрів для оновленого показника витрати води.

Враховуючи, що момент опору для кожного типу насосів відрізняється, закон керування ШІМ-перетворювачем $U = f(f)$, також повинен бути різним. Пропонований адаптивний алгоритм буде регулювати частоту обертання електродвигуна насоса, щоб тиск завжди залишався стабільним при мінімальному споживанні електроенергії.

З цього можна висунути гіпотезу, що застосування адаптивного алгоритму керування ШІМ-перетворювачем дозволить знизити споживання електроенергії на 6...8%. Для демонстрації експериментальної установки була створена модель експериментальної установки в AutoCAD (див. рисунок 2.13).

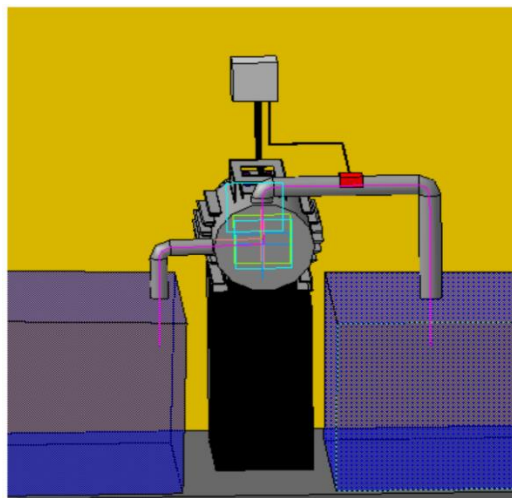


Рисунок 2.13 – Модель системи водопостачання в AutoCAD

2.5 Висновки до розділу

Вивчення втрат потужності підкреслює необхідність створення адаптивного методу керування ЧП для насосів водопостачальної системи, який сприятиме зниженню використання електричної енергії. Висновки з математичного моделювання вказують на те, що зміна напруги при сталій частоті мережі знижує значення струму статора на 3%, що в свою чергу знижує споживання електроенергії. Необхідно здобути експериментальні дані для підтвердження результатів математичного моделювання щодо енергозбереження за допомогою адаптивного методу управління частотним перетворювачем.

3 РОЗРАХУНКОВО–ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Програма та методика проведення експериментальних досліджень

Перший експеримент полягає у встановленні механічної характеристики поверхневого насоса. Ціль цього експерименту - вивчити, як частота обертання ротора залежить від моменту опору робочого обладнання (насоса).

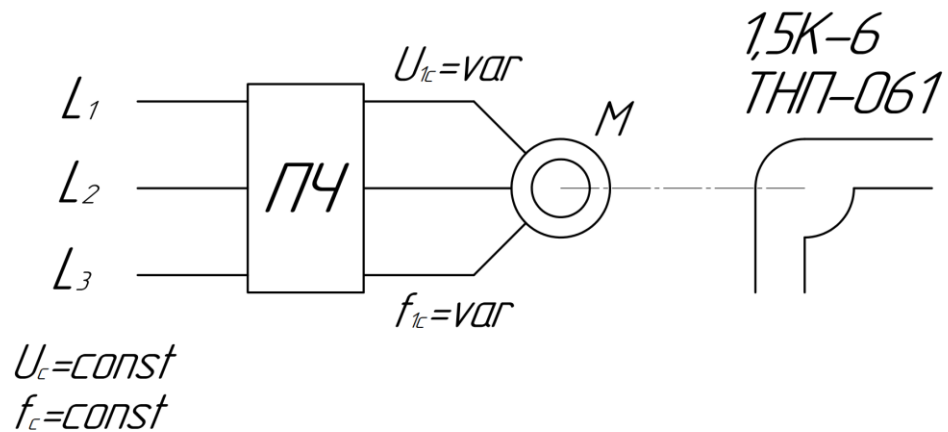


Рисунок 3.1 – Схема експерименту №1



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд експериментальної установки

Для проведення цього експерименту необхідні:

- насос 1,5К-6 ТНП-061 спільно з асинхронним електродвигуном АІР 80А2 потужністю 1,5 кВт;
- тахометр SANWA SE9000М;
- перетворювач частоти.

Схему експерименту і загальний вигляд експериментальної установки представлено на рисунках 3.1 і 3.2.

Порядок проведення експерименту:

- тахометром вимірюється частота обертання АД насоса за умов $f = 20 \dots 50$ Гц, $\Delta f = 5$ Гц;
- будуються механічні характеристики електродвигуна за формулою (2.12);
- будується момент опору насоса;
- проводиться порівняльний аналіз для визначених теоретичного та експериментального моментів опору;
- за механічними характеристиками будуються швидкісні характеристики за формулою (2.17).

З допомогою механічних характеристик знаходиться мінімальне значення струму статора при кожній частоті мережі.

Другий експеримент полягає в аналізі впливу частоти на енергетичні параметри електроприводу при сталій напрузі U_c , використовуючи аналізатор якості електроенергії НІОКІ 3196.

Метою цього експерименту є дослідження змін струму статора під час регулювання частоти живлення мережі при напрузі $U_c = 380$ В.

Схему експерименту представлено на рисунку 3.3.

Для проведення цього експерименту необхідно:

- насос 1,5К-6 ТНП-061 спільно з асинхронним електродвигуном АІР 80А2 з номінальною потужністю 1,5 кВт;
- аналізатор якості електроенергії LUTRON DW-6092;
- перетворювач частоти.

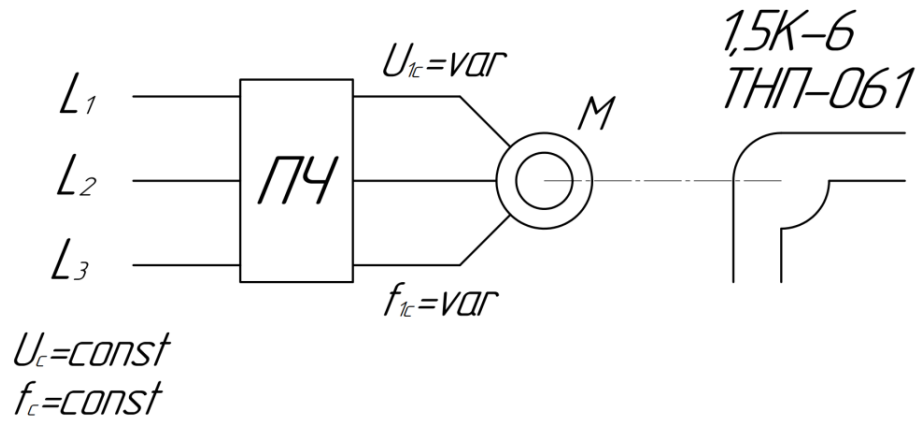


Рисунок 3.3 – Схема експерименту №2

Експеримент проводиться таким чином:

- аналізатор якості електроенергії під'єднують у мережу за схемою, представленою на рисунку 3.4;

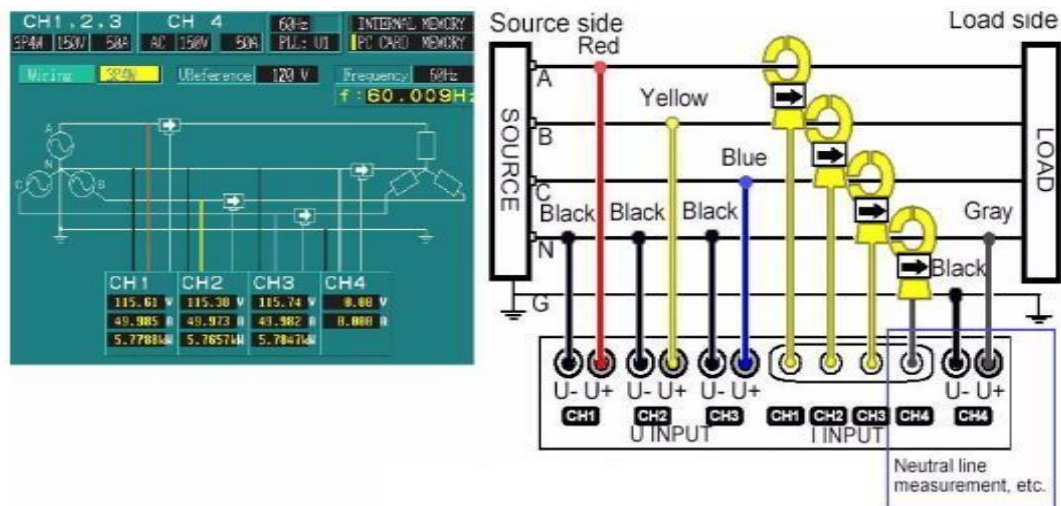


Рисунок 3.4 – Підключення LUTRON DW-6092 до електричної мережі

- вимірюють необхідні характеристики електроприводу за постійної фазової напруги $U=220V$ регулюючи частоту від 20 до 50 Гц із кроком 5 Гц.

Третій експеримент полягає в аналізі впливу зміни частоти та напруги мережі на енергетичні параметри електроприводу. Дослідження також включає в себе визначення взаємозв'язку між мінімальними енергетичними характеристиками та вхідною напругою та частотою..

Метою цього експерименту є дослідження змін струму статора під час регулювання частоти і напруги живлення мережі.

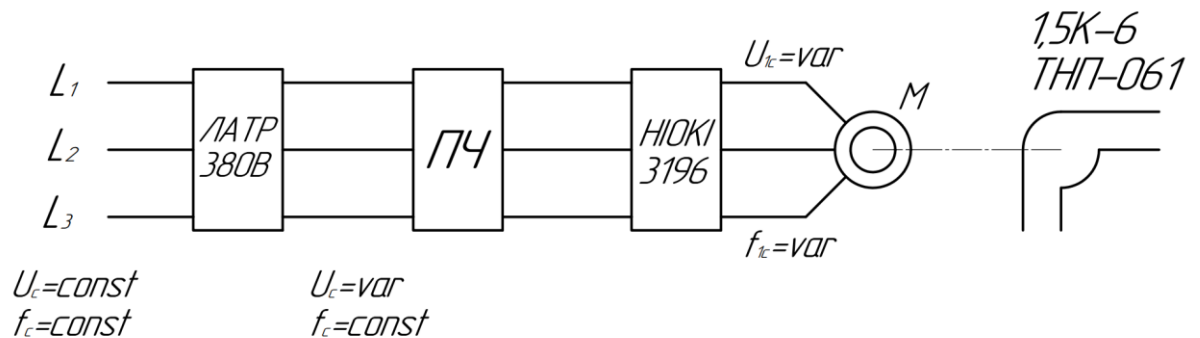


Рисунок 3.5 – Схема експерименту №3

Схему експерименту № 3 представлено на рисунку 3.5.

Для проведення цього експерименту необхідно таке:

- насос 1,5К-6 ТНП-061 спільно з асинхронним електродвигуном АІР 80А2 потужністю 1,5 кВт [4];
- аналізатор якості електроенергії LUTRON DW-6092;
- перетворювач частоти;
- Лабораторний автотрансформатор 380 В;
- Експеримент проводиться таким чином:
- аналізатор якості електроенергії під'єднують у мережу за схемою, представленою на рисунку 3.4;
- Проводять вимірювання енергетичних показників електропривода під час модифікації лінійної напруги за допомогою ЛАТРа в інтервалі від 280 до 400 В. Також визначають енергетичні характеристики при налаштуванні частоти за допомогою перетворювача частоти в діапазоні від 20 до 50 Гц з кроком 5 Гц.
- У четвертому етапі дослідження проводиться аналіз взаємодії тиску у системі водопостачання і струму статора фази А.

Ціль цього експерименту є дослідження, як енергетичні характеристики електропривода змінюються в залежності від тиску в мережі водопостачання.

Головною метою цього дослідження є вивчення варіацій енергетичних характеристик електропривода в контексті змін тиску у системі водопостачання.

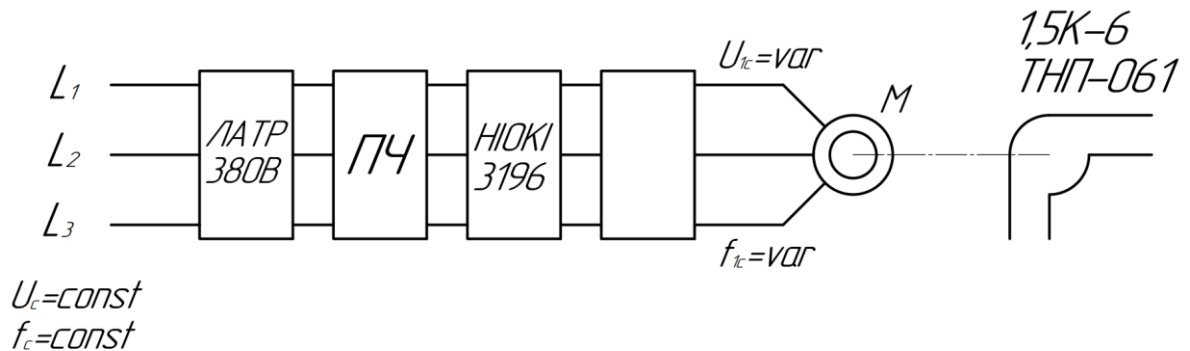


Рисунок 3.6 – Схема експерименту №4

Схему експерименту № 4 представлено на рисунку 3.6.

Для проведення цього експерименту необхідно таке обладнання:

- насос 1,5К-6 ТНП-061 спільно з асинхронним електродвигуном АІР 80А2 потужністю 1,5 кВт;
- аналізатор якості електроенергії LUTRON DW-6092;
- перетворювач частоти ;
- ЛАТР 380 В;
- датчик тиску;
- Експеримент проводиться таким чином:
- за допомогою LUTRON DW-6092 вимірюється струм фази;
- за допомогою манометра вимірюється тиск у мережі водопостачання;
- за допомогою тахометра визначаються обороти електродвигуна.

3.3 Обробка та аналіз експериментальних даних

У першому експерименті проводилась перевірка теоретичних та експериментальних механічних параметрів насосного агрегату. Для цього була складена та використана відповідна установка (рисунок 3.2). Розрахункові дані теоретичної залежності наведено в таблиці 3.1 і таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Теоретичний момент моменту опору насоса 1,5К-6 ТНП-061 в залежності від швидкості обертання двигуна

п, об/хв	0	286	573	859	1146	1432	1719	2005	2292	2578	2873
Мст1, Н·м	1,5	1,53	1,6 3	1,81	2,05	2,36	2,75	3,20	3,72	4,31	4,99

Таблиця 3.2 – Теоретичний момент моменту опору насоса К20/30а в залежності від швидкості обертання двигуна

п, об/хв	0	286	573	859	1146	1432	1719	2005	2292	2578	2873
Мст2, Н·м	3,0	3,1	3,3	3,6	4,1	4,7	5,5	6,4	7,4	8,6	9,9

Експериментальні дані теоретичної залежності наведено в таблиці 3.3 і таблиці 3.4.

Таблиця 3.3 – Експериментальні дані моменту опору насоса 1,5К-6 ТНП-061

п, об/хв	0	299	598	892	1181	1463	1738	1989	2227	2423	2510
Мс, Н·м	0	0,16	0,17	0,48	0,85	1,32	1,80	2,58	3,31	4,28	5,55

Таблиця 3.4 – Експериментальні дані моменту опору насоса К20/30а

п, об/хв	0	292	592	885	1170	463	1732	1978	2254	2386	2738
Мс, Н·м	0	3,83	2,4	3,03	4,79	5,27	7,84	11,05	14,86	18,88	20,8

Результати експерименту представлені на рисунку 3.7 для двох насосів 1,5К-6 ТНП-061 і К20/30а.

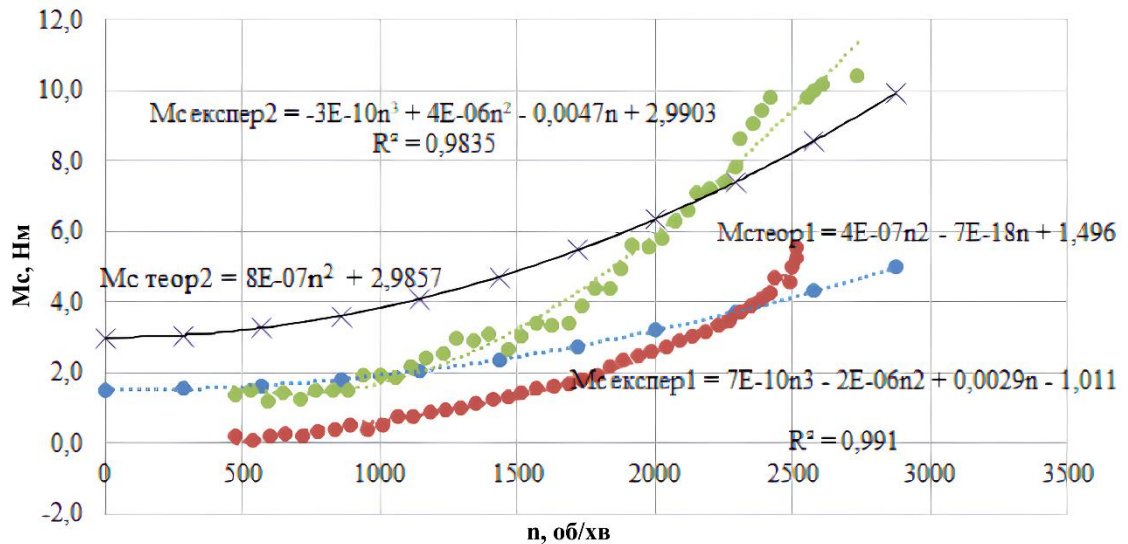


Рисунок 3.7 – Графіки механічних характеристик насосного агрегату 1,5К-6 ТНП-061 (1) і К20/30а (2)

Виявлено значну розбіжність між теоретичними та експериментальними залежностями, що призводить до підвищення споживання електроенергії. Відмінність теоретичного моменту від експериментального може досягати 50%.

Не є доцільним вибрати закон керування для кожного окремого електродвигуна з постійним тиском в трубопроводі на виході насоса. Замість цього, більш ефективним є створення методу керування ШІМ-перетворювачем, який би автоматично підбирав параметри для конкретного НА, стабілізуючи тиск на виході агрегату та знижуючи споживання електроенергії.

У цьому випадку використання лише мінімального значення струму для зменшення споживання не гарантує найменшого енергоспоживання. Тому було проведено ряд експериментальних досліджень, щоб визначити мінімальне значення активної потужності при постійній частоті мережі та зміні живильної напруги. Оскільки експериментальний момент опору відрізняється від теоретичного, ми вирішили дослідити, як змінюється струм під час регулювання напруги під графічного визначення струму статора (див. рисунок 3.8).

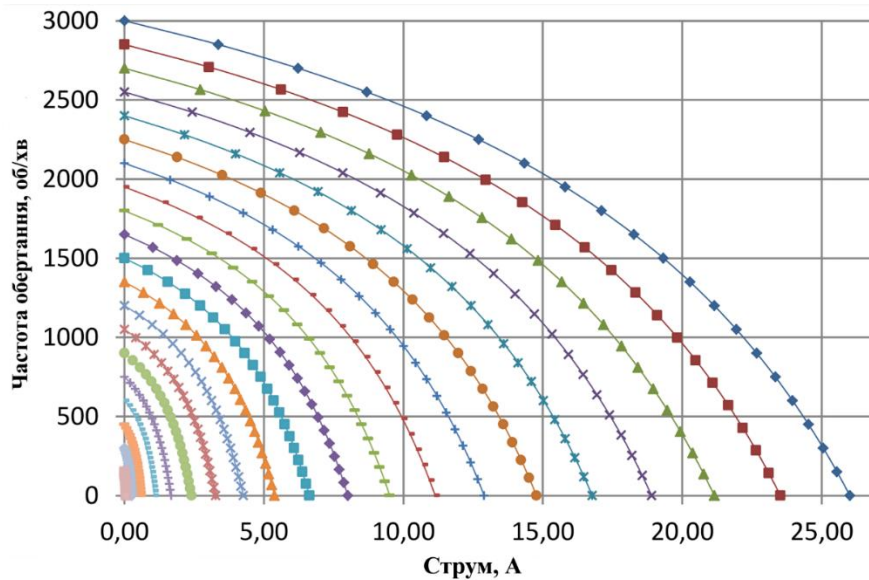


Рисунок 3.8 – Швидкісні характеристики електропривода насоса

Висновок з аналізу даних залежностей (див. рисунок 3.8) полягає в тому, що струм статора змінюється під час регулювання напруги на визначеній частоті. Тому, для перевірки цього припущення, необхідно провести експеримент. Графік, що ілюструє залежність струму статора від частоти живильної мережі 50 Гц і регулювання живильної напруги, представлено на рисунку 3.9.

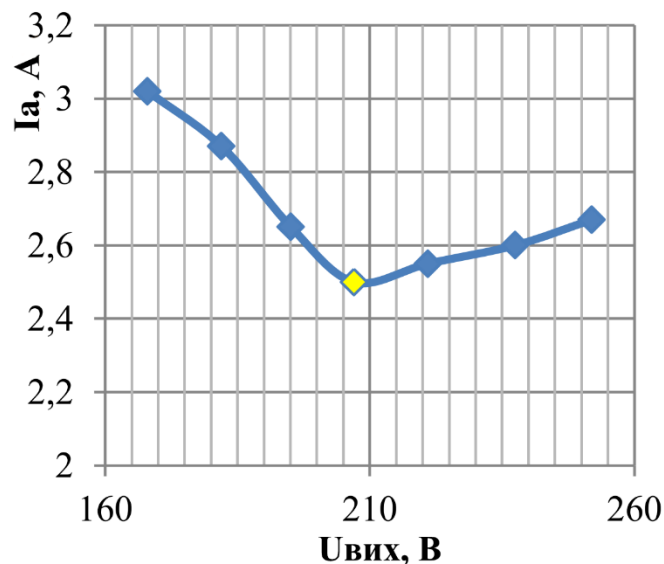


Рисунок 3.9 – Графік залежності фазного струму статора від фазної напруги за частоти напруги 50 Гц

Вивчення рисунка 3.9 дозволяє встановити, що при зміні фазної напруги фазний струм досягає мінімальної точки, після якої він значно збільшується.

Тому, в адаптивному методі керування перетворювачем частоти, важливо визначити такі параметри напруги та частоти живильної мережі, які б забезпечували мінімальний струм статора, а отже, і мінімізували споживання енергії.

Графіки, що відображають залежності активної, реактивної та повної потужностей від напруги, представлені на рисунку 3.10.

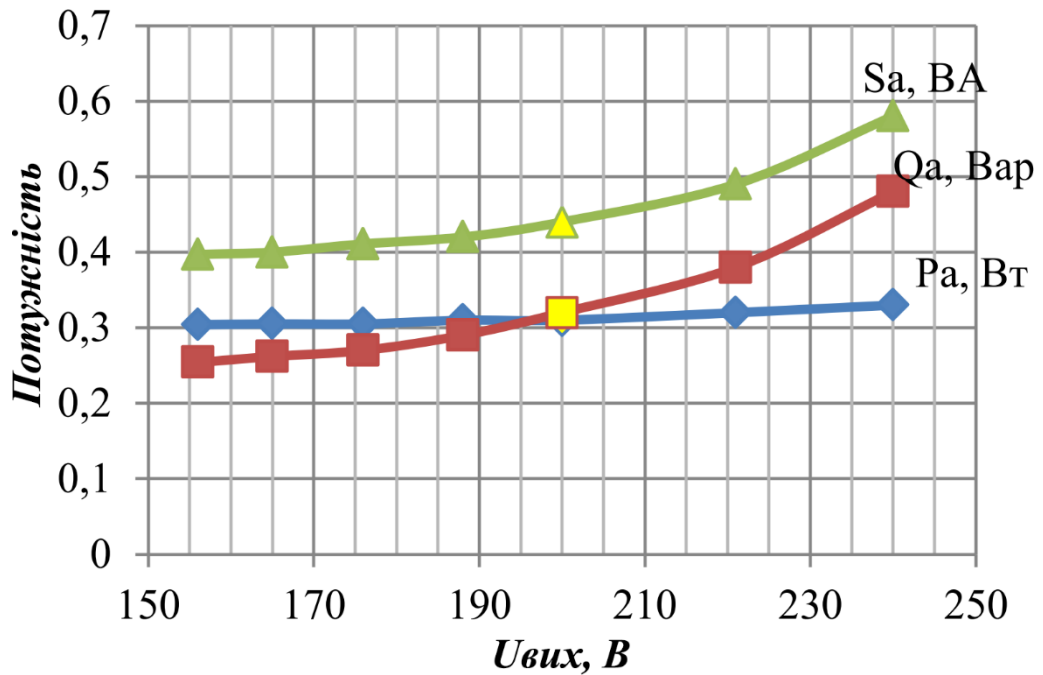


Рисунок 3.10 – Графіки залежностей активної, реактивної та повної потужностей від фазної напруги за частоти 50 Гц

На рисунку 3.11 показано графік залежності коефіцієнта потужності від фазної напруги.

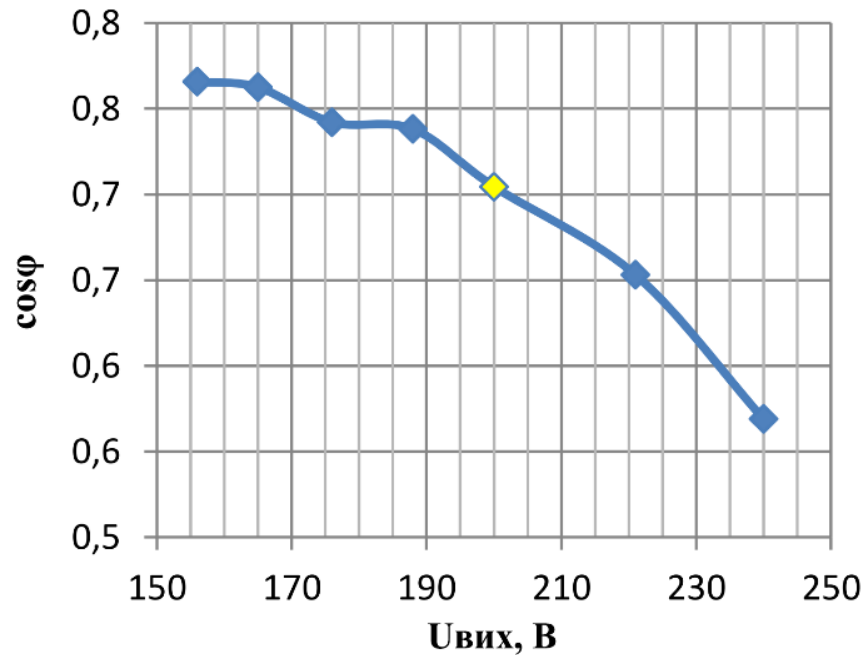


Рисунок 3.11 – Залежність коефіцієнта потужності від фазної напруги за частоти 50 Гц

Вивчення даних, представлених на рисунках 3.9 – 3.11, дозволило встановити, що при частоті живильної мережі 50 Гц напруга $U_{\text{ф}} = 207 \text{ В}$ є найбільш енергоефективною. Зі збільшенням фазної напруги спостерігається зростання реактивної потужності, тоді як зі зменшенням фазної напруги активна потужність зростає відносно реактивної, що призводить до збільшення фазного струму.

Вивчаючи залежність коефіцієнта потужності від фазної напруги, можна зробити висновок, що при мінімальному фазному струмі коефіцієнт потужності майже максимальний, оскільки при зниженні напруги спостерігається різке зниження реактивної потужності. Проте подальше збільшення коефіцієнта потужності призведе до збільшення струму, що збільшує споживання електроенергії.

Щоб підтвердити незвичайність закону керування ШІМ-перетворювача, ми побудуємо графік залежності $f = f(U)$ (див. рисунок 3.12), використовуючи оптимальні значення фазної напруги для різних частот живильної мережі.

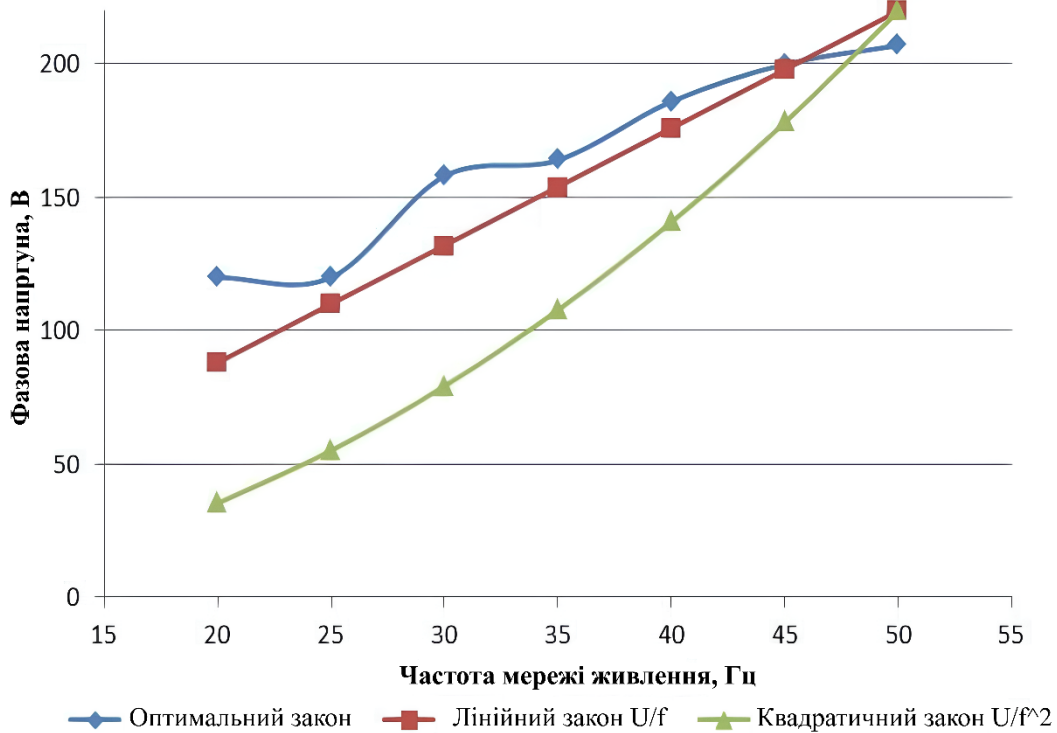


Рисунок 3.12 – Відмінність законів регулювання ШІМ-перетворювача частоти при адаптивному способі управління електродвигуном

Для співставлення адаптивного методу керування та лінійного закону керування ШІМ-перетворювачем було складено графік, який відображає залежність активної потужності електродвигуна від частоти живильної мережі (див. рисунки 3.13, 3.14). По графіку видно, що активна потужність слабо змінюється для цих законів.

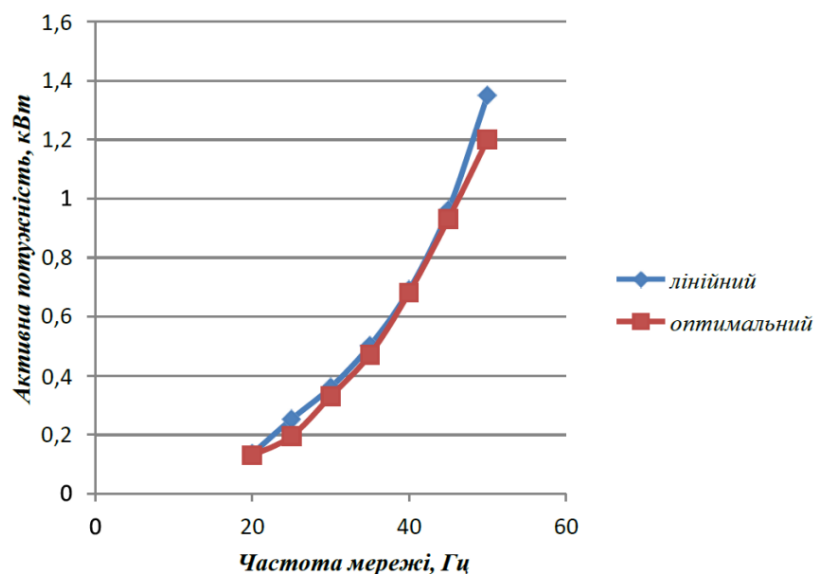


Рисунок 3.13 – Графік зміни активної потужності за лінійного закону й адаптивного способу керування ШІМ–перетворювачем

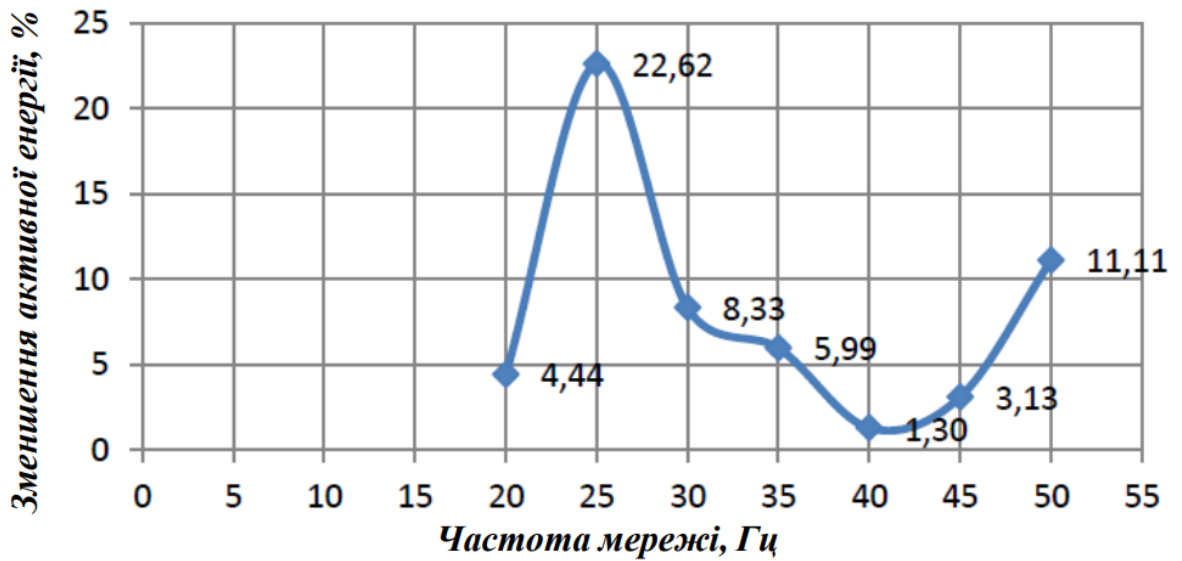


Рисунок 3.14 – Графік зменшення активної потужності за адаптивного способу управління

Фазні струми (рисунок 3.15, 3.16) найменші при регулюванні частот 25–35 Гц, тому доходимо до висновку, що за однакової потужності відбувається зменшення споживання електроенергії.

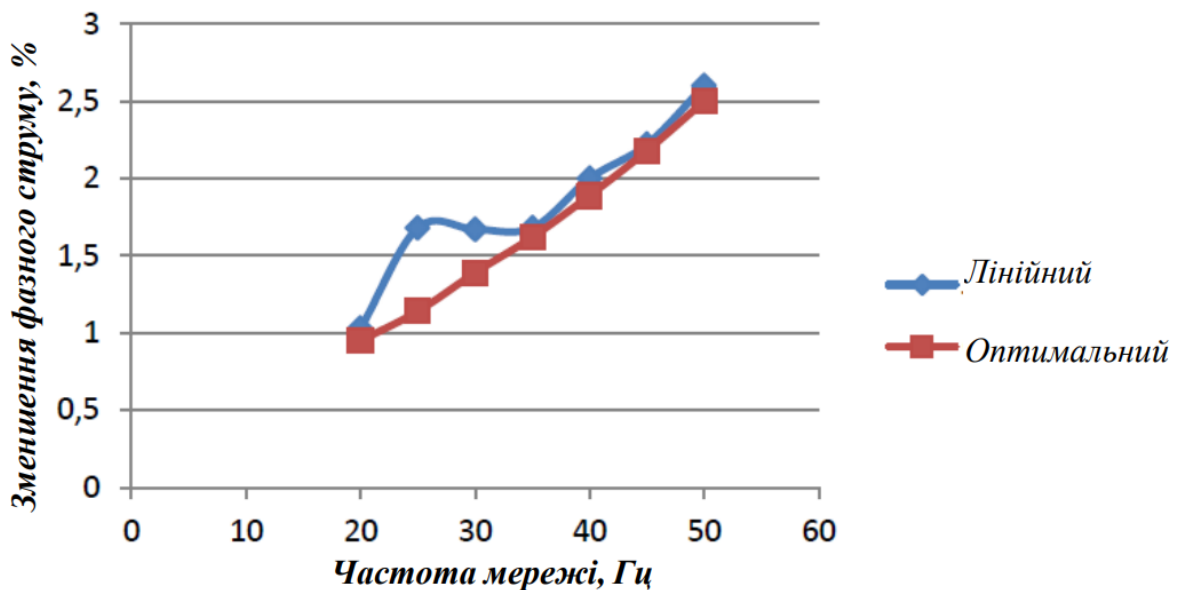


Рисунок 3.15 – Фазний струм за лінійного й оптимального закону управління ШІМ–перетворювачем

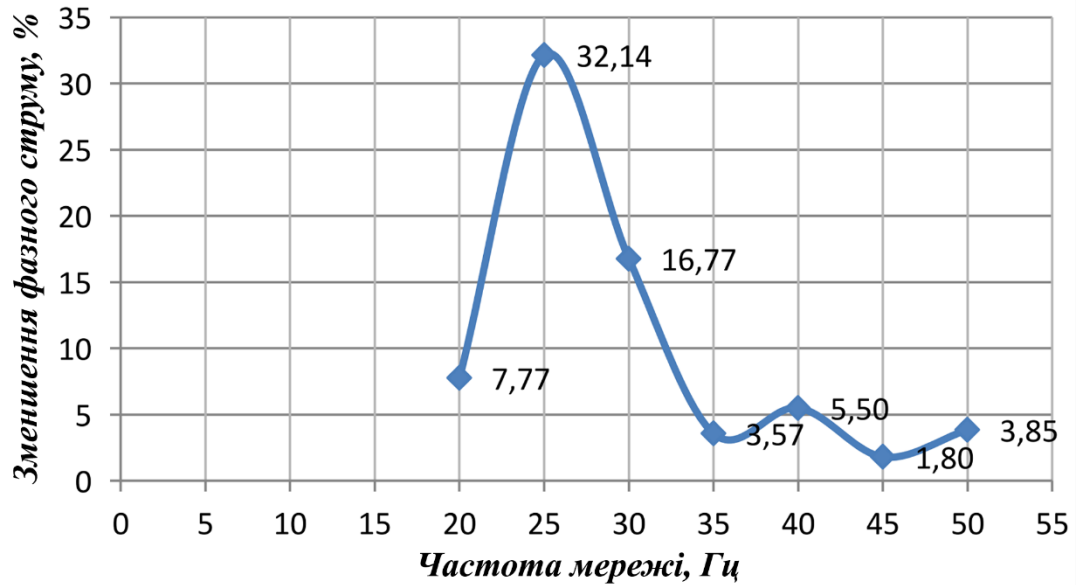


Рисунок 3.16 – Графік зменшення фазного струму за адаптивного закону керування порівняно з лінійним законом керування ШІМ–перетворювачем

В процесі регулювання напруги відбуваються зміни в амплітуді фазного струму та частоті обертання асинхронного двигуна, що сприяє ефективному використанню електроенергії.

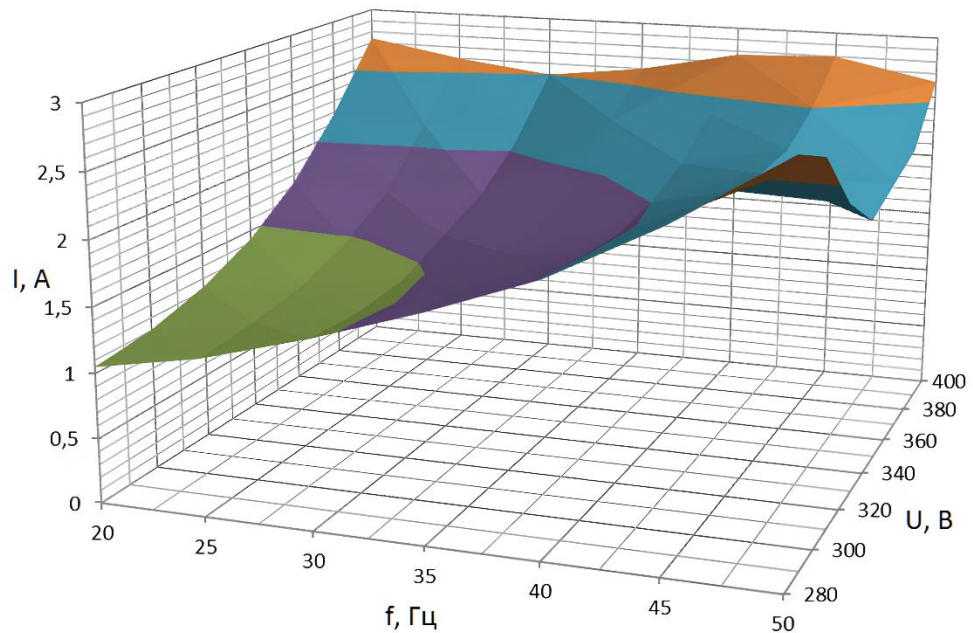


Рисунок 3.17 – Зміна фазового струму в залежності від зміни фазної напруги та частоти мережі живлення

Висновок з аналізу даних на рисунку 3.17 полягає в тому, що при однаковій частоті та різних значеннях напруги можливо визначити найменше значення фазного струму, а отже, і мінімізувати споживання енергії. При зміні напруги при сталій частоті обертання спостерігається зниження струму від 1% до 20% і більше, що веде до зменшення споживання електроенергії.

На рисунку 3.18 демонструється, як змінюється частота обертання під час регулювання напруги. Як видно з рисунку 3.18, при однаковій частоті та різних значеннях напруги частота обертання змінюється на 30–50 об/хв, що практично не впливає на тиск у системі водопостачання. Це дозволяє зробити висновок про адекватність математичної моделі фізичній.

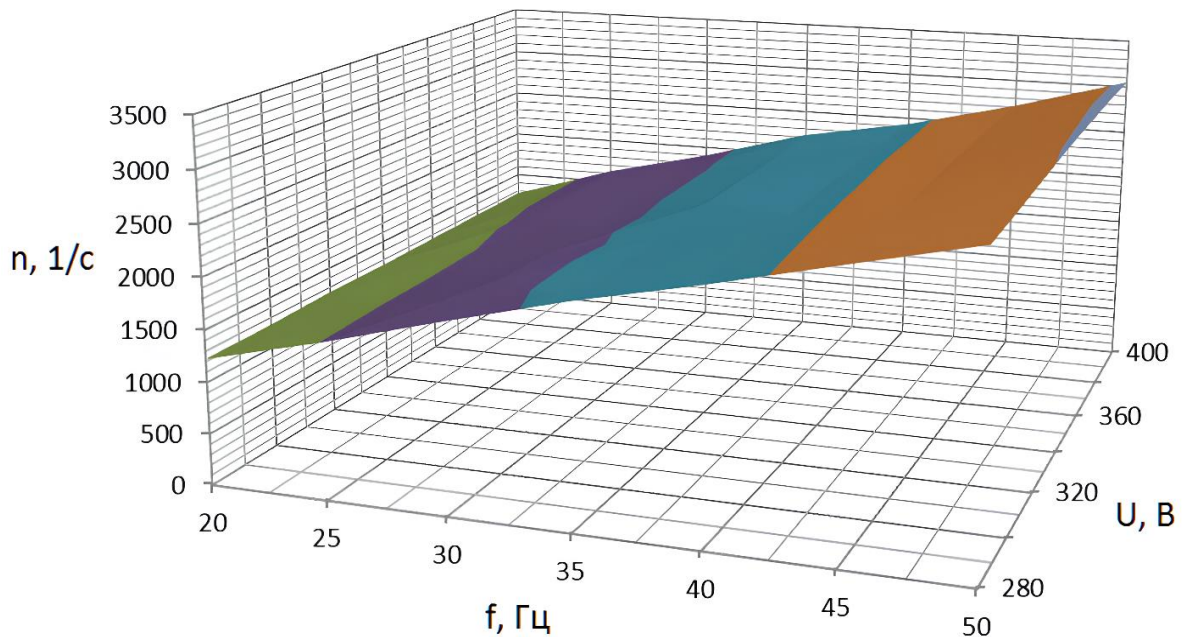


Рисунок 3.18 –Зміна частоти обертання ротора в залежності від зміни фазної напруги та частоти мережі живлення

Дослідження п'ятого експерименту включало в себе аналіз взаємозв'язку між струмом статора та тиском у системі водопостачання. Результати подано у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Дані залежностей між струмом статора та тиском у системі водопостачання при різних частотах обертання

I, A	2,75	2,65	2,6	2,5	2,4	2,32	2,3	2,25	2,15	2,1
$P, атм$	0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
$n, об /хв$	2919	2962	2930	2933	2937	2940	2943	2948	2952	2955

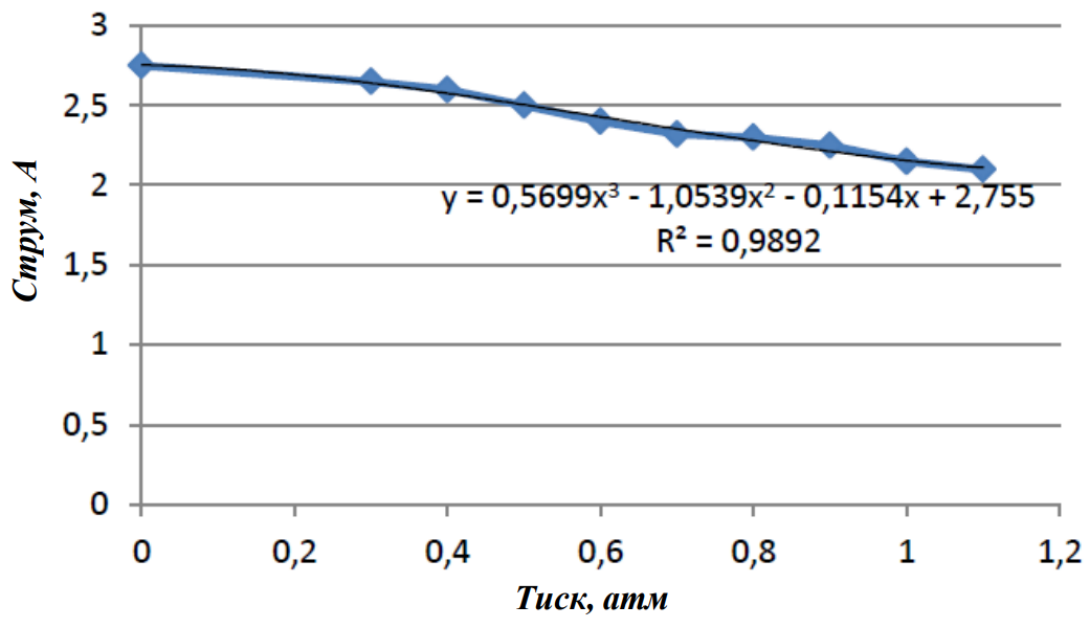


Рисунок 3.19 – Графік залежності струму статора від тиску в системі водопостачання

На рисунку 3.19 ілюструється відношення між струмом статора електродвигуна насоса фази А та тиском у системі водопостачання. З цього графіка видно, що зі зростанням тиску в системі водопостачання струм знижується. Це свідчить про те, що можливе досягнення енергоефективності при високому та стабільному тиску в системі водопостачання.

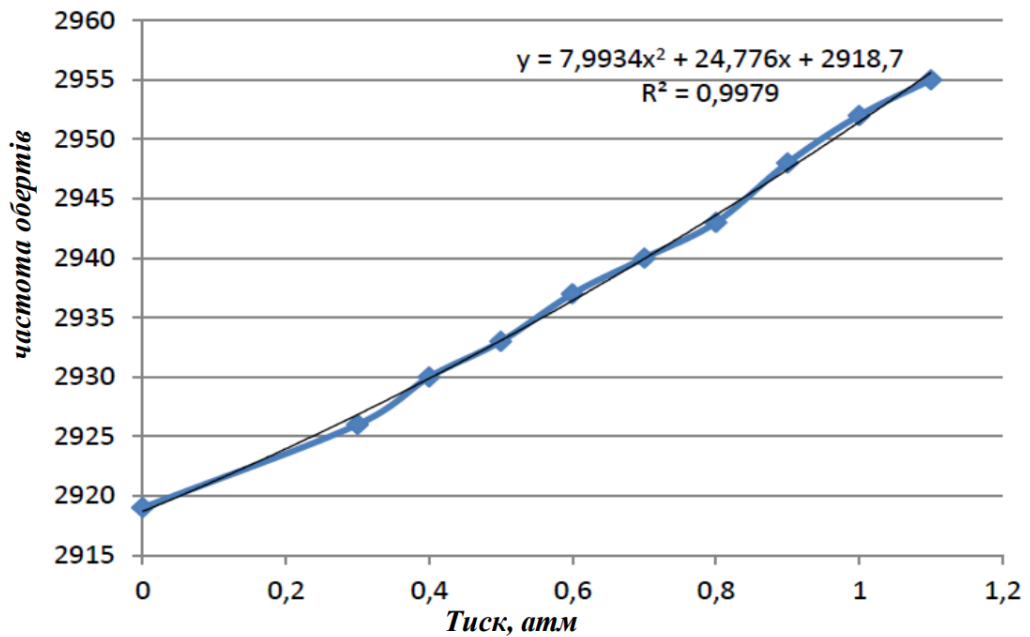


Рисунок 3.20 – Графік залежності частоти обертання валу АД від тиску в системі водопостачання

Рисунок 3.20 демонструє відношення між частотою обертання та тиском у системі водопостачання. З цього графіка видно, що з підвищенням тиску частота обертання двигуна також зростає, що веде до роботи електроприводу при номінальному навантаженні. Це сприяє енергозбереженню та покращенню енергетичних показників електроприводу. Для втілення цього методу була створена програма на мові Сі для мікроконтролера виробництва AVR. На основі цієї програми було розроблено експериментальний прототип перетворювача частоти, який представлено на рисунку 3.21.

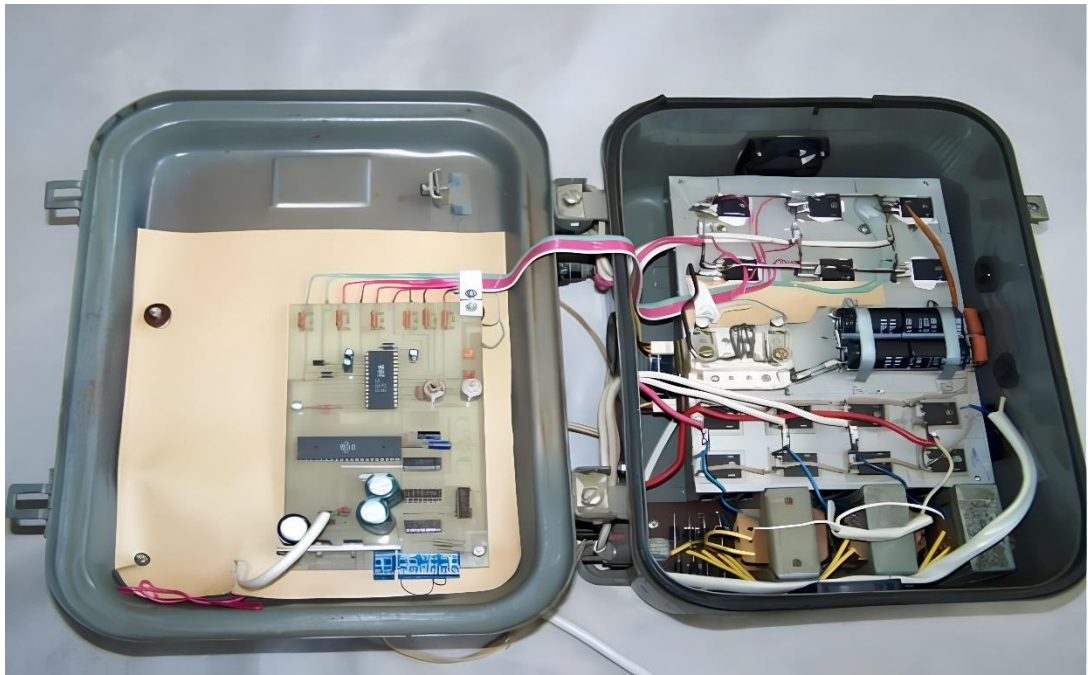


Рисунок 3.21 – Експериментальний прототип ШІМ-перетворювача

Діаграма, побудована для порівняння коефіцієнта корисної дії електроприводу в системах баштового та прямоточного водопостачання (див. рисунок 3.22), демонструє, що ККД електроприводу при адаптивному методі керування є вищим.

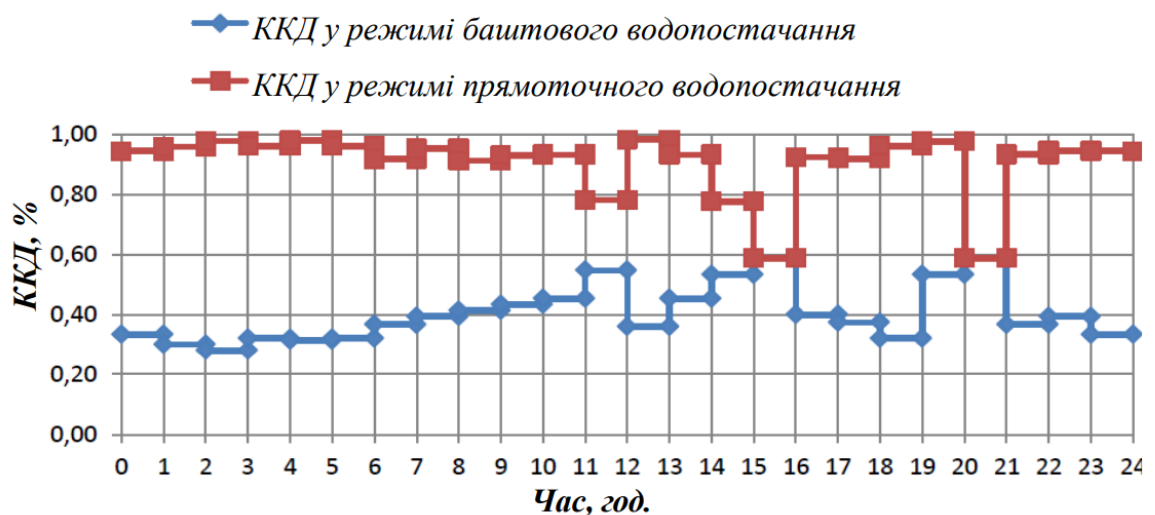


Рисунок 3.22 – Порівняльна добова діаграма ККД електроприводу при використанні баштової та прямоточної систем водопостачання із застосуванням адаптивного способу управління перетворювачем частоти

Отже, застосування цього методу керування в сучасних перетворювачах частоти дозволяє значно скоротити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи електроприводу.

3.4 Висновки до розділу

Експериментальні дослідження показали, що фактичний момент опору поверхневого насоса може відрізнятись від теоретичного на 50%. Тому адаптивний метод керування перетворювачем частоти автоматично вибирає параметри, що забезпечують енергоефективність, незалежно від типу та потужності двигуна робочої машини. Внаслідок вибору значень напруги струм статора зменшився на 7...10% в залежності від частоти мережі живлення.

Мінімальний фазний струм досліджуваного електродвигуна I_a (А) досягається при фазній напрузі $U = 260 \dots 344$ В і частоті регулювання $f = 15 \dots 34$ Гц.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙТИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Небезпечні фактори які можуть виникнути при роботі у насосній станції

Усі підприємства дбають про безпеку праці і піклуються про здоров'я своїх працівників. До обов'язків роботодавця входить розробка заходів з охорони праці, які повинні гарантувати безпечні і здорові умови праці на робочому місці. Сучасний стан організації праці при відсутності наукових та проектних розробок нових технологій, наявності недосконалого обладнання і управлінських рішень щодо безпечних умов праці, не гарантує стовідсоткової безпеки працівникам. Тому на підприємствах для відшкодування впливу небезпечних і шкідливих чинників виробництва на організм людини застосовується система пільг і компенсацій. Так, працівники, які працюють в умовах, що не відповідають нормам безпеки і санітарним нормам, користуються пільгами та отримують компенсацію [12].

Згідно ДСТУ 12.0.003-74 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація», при обслуговуванні системи керування насосною установкою, у приміщенні насосної станції існують такі шкідливі та небезпечні фактори:

Фізичні:

- недостатність освітлення робочої зони;
 - недостатність природного освітлення;
 - підвищений рівень шуму на робочому місці;
 - підвищений рівень вібрації;
 - підвищений рівень запиленості робочої зони;
 - підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
 - підвищена вологість повітря у робочій зоні;
 - понижена рухомість повітря.
- Психофізіологічні:
- фізичні перевантаження (статичні);

– нервово-психічні перевантаження.

4.2 Організаційні і технічні засоби безпечного проведення робіт з електроустановками напругою до 1 кВ

Забезпечення безпечних умов праці в нашій країні є загальнодержавним завданням. В умовах зростання електроспоживання та розширення областей використання електричної енергії особливе значення у загальній системі заходів по охороні праці набувають проблеми забезпечення електричної безпеки.

Роботи щодо забезпечення електропостачання виконуються з урахуванням накопиченого в світі досвіду вдосконалення способів і засобів захисту, розробці керівних, нормативних та інструктивних документів, активізації діяльності енергосервісних підприємств та організацій.

Створені передумови для вирішення питань електричної безпеки в взаємозв'язку з елементами системи. Введено в дію такі важливі для електровзв'язку документи, як Система стандартів безпеки праці (ССБП), методичні вказівки на розслідування виробничого травматизму.

При організації нових та технічного переоснащення старих та насосних станцій дотримуються діючих норм, інструкцій, державних стандартів та правил охорони праці, техніки безпеки та вибухобезпечності.

До основних заходів з охорони праці та техніки безпеки відносяться:

- установка захисних огорожень у рухомих елементів, верстатів та пристосувань;
- заземлення всього обладнання та металевих перегородок випробувальних станцій та інших ділянок;
- застосування зниженої напруги для місцевого освітлення робочих місць;
- укриття, герметизація та теплоізоляція обладнання, виділення ароматичних речовин і теплоти, а також установка місцевих відсосів для їх видалення.

4.3 Експлуатація електрообладнання насосних станцій та агрегатів

Режими роботи насосних станцій взаємопов'язані з режимами робіт систем водопостачання та водовідведення в цілому з урахуванням режимів роботи мереж, резервуарів, очисних мереж.

Експлуатаційний персонал насосних станцій зобов'язаний:

- підтримувати заданий режим роботи насосних агрегатів;
- контролювати стан і робочі параметри основних насосних агрегатів, запірно-регулюючої арматури, електрообладнання, контрольно-вимірювальних приладів, засобів автоматики і диспетчерського управління, а також конструкцій будівель;
- вести систематичний облік роботи агрегатів насосної станції;
- вживати заходів до усунення аварійних ситуацій. Помічені черговим персоналом несправності аварійного характеру ліквідуються негайно;
- дотримуватися вимог техніки безпеки та охорони праці;
- підтримувати належний санітарний та протипожежний стан в приміщеннях насосної станції;
- своєчасно проводити планові ревізії, поточні та капітальні ремонти обладнання.

Під час чергування оперативний персонал періодично здійснює обхід насосної станції та проводить огляд обладнання, звертаючи увагу на показання контрольно-вимірювальних приладів, шум насосів та іншого обладнання, нагрів корпусів підшипників, насосів, електродвигунів, стан заземлення електрообладнання.

На кожен агрегат оформляють технічний паспорт, який повинен містити відомості про технічні параметри агрегату, ремонтах і результати експлуатаційних випробувань, зміни, внесені до його конструктивні параметри (обточування діаметру робочого колеса, розмір зазорів).

На кожному агрегаті, механізмі, апараті зберігається заводська паспортна табличка з технічними характеристиками.

На всіх насосних агрегатах, засувках, затворах і інших механізмах

наносять фарбою добре видимі порядкові номери, відповідно до оперативної документації. На трубопроводах та інших комунікаціях наносять умовне маркування, що вказує їх призначення.

В інструкції з експлуатації насосних агрегатів відображається послідовність операцій пуску і зупинки насосних агрегатів, способи регулювання їх робочих параметрів, допустимі температури підшипників та інших вузлів агрегатів, діапазон зміни рівня і тиску масла в маслосистемах, перелік несправностей і способів їх усунення.

Допустима кількість включень і відключень насосних агрегатів регламентується заводами - виготовлювачами насосів, електродвигунів і комутаційних апаратів (вимикачів, контакторів).

Перед пуском насосного агрегату в роботу перевіряється:

- стан напірних і всмоктувальних засувок;
- заповнення корпусу насоса водою або стоками;
- стан сальників, муфтових з'єднань, захисних огорожень;
- стан контрольно-вимірювальних приладів і засобів управління пусковими пристроями;
- наявність масла в підшипниках і підп'ятниках.

Пуск насосів може здійснюватися двома способами: на відкриту або закриту засувку на напірному трубопроводі.

При довгих напірних водоводах, а також при великій статичній складовій напору пуск відцентрових насосів здійснюється на відкриту засувку. При цьому насос оснащений зворотним клапаном.

При коротких водоводах і малій статичній складовій напору пуск відцентрових насосів здійснюється на закриту засувку.

При виборі способу пуску насосів враховується також конструкція запірно-регулюючої арматури (засувка, поворотний затвор, конусний затвор).

Засувка на всмоктувальному трубопроводі при будь-яких способах пуску повинна завжди бути повністю відкрита.

Зупинка насосних агрегатів в нормальних умовах здійснюється на

попередньо закрити засувку на напірному трубопроводі.

При аварійному відключенні електроживлення відбувається неконтрольована зупинка агрегатів на відкриті напірну засувку. Тому в ході експлуатації передбачаються заходи щодо зменшення величини гідравлічного удару, якщо вони не передбачені проектом. До таких заходів належать: установка клапанів для впускання повітря на водоводах, установка лічильників води із сповільненою посадкою, пропуск потоку води через насос в зворотному напрямку.

Тривала робота насосів (більше 3 хв.) при закритій напірній засувці або закритому зворотному клапані не допускається.

Не допускається робота насосних агрегатів при перевантаженнях, кавітації, помпажу, поза зоною оптимальних ККД, при підвищеній вібрації, перегрів підшипників і інших вузлів агрегатів.

Насосні агрегати працюють в економічному режимі, який забезпечується:

- роботою насосів в зоні оптимальних значень ККД, тобто в дозволеному робочому діапазоні змін витрати і тиску;
- контролем зносу обладнання (насосів, затворів, засувок, клапанів) і усуненням виявленого зносу;
- підтриманням відповідності режиму роботи насосних станцій режиму роботи водопровідних і каналізаційних мереж.

Знос обладнання контролюється при виконанні щорічних планів профілактичних оглядів та ремонту обладнання, а також при порівнянні фактичних робочих характеристик насосів з вихідними або каталожними характеристикам.

Для зняття фактичних характеристик забезпечується можливість постійного або періодичного вимірювання витрат води, що перекачується і потужності насосних агрегатів.

Приведення у відповідність режиму роботи насосних станцій з режимом роботи водопровідних або каналізаційних мереж здійснюється правильним підбором насосних агрегатів із змінними режимами водоподачі або

використанням насосів з регульованим приводом.

Для ефективного регулювання режимів роботи на кожній станції завчасно розроблені режимні карти і типові графіки, які регламентують умови застосування різних способів регулювання в залежності від реальних режимів водоспоживання або припливу стічних вод.

Агрегат негайно (аварійно) відключається:

- у разі нещасного випадку (або його загрози) з людиною, що вимагає негайної зупинки електродвигуна;
- появи явного і незворотного стуку або шуму в агрегаті;
- появи диму або вогню з двигуна агрегату або його пускорегулювальної апаратури;
- вібрації понад допустимі норми, яка загрожує цілісності агрегату; д) поломки агрегату;
- нагріванні підшипника понад допустимої температури;
- падінні тиску в маслосистемі.

На насосних агрегатах нанесені стрілки, що вказують напрямок обертання двигуна і робочого колеса насоса.

На всіх механізмах, запірно-регулюючих і пускорегулюючих пристроях нанесені написи, номери і знаки, що вказують, до якого агрегату або механізму вони відносяться, а також написи «пуск» і «стоп».

Обертіві частини агрегатів і механізмів (шків, муфти та ін.) закриті огороженнями, зняття яких під час роботи забороняється.

Агрегати, що знаходяться в резерві, постійно готові до негайного пуску та періодично оглядаються і випробовуються за затвердженим графіком.

Вібрація агрегатів, виміряна на кожному підшипнику, не повинна перевищувати значень, вказаних в заводській документації.

Для великих водозаборів з зануреними насосами доцільна схема подачі води споживачеві в два етапи з групою насосів другого підйому, що подають воду з проміжного резервуара.

При підвищенні показань амперметра, що може бути наслідком винесення

з водою піску, слід дещо зменшити подачу насоса, прикривши засувку на напірної лінії. У міру зменшення виносу піску засувку слід поступово відкривати до попереднього стану. Аналогічно надходять на свердловинах, у відкачуваній воді яких вміст піску перевищує допустимий для встановленого водопідіймального обладнання.

При різкому підвищенні показань амперметра або появі стороннього шуму при роботі насоса слід негайно зупинити електродвигун.

У каналізаційних насосних станціях передбачена припливно-витяжна вентиляція з посиленням обміном повітря з кратністю не менше п'яти. Для попередження витягування газів з підвідного колектора в прийомних резервуарах передбачене деяке перевищення кількості припливного повітря над кількістю що відсмоктується.

Для попередження загнивання осаду його відкачують з приймального резервуара не рідше 1 разу на 3 дні. Для розмиву злежалого осаду від напірних водоводів передбачаються спеціальні змивні трубопроводи з засувками.

Напірні трубопроводи насосних станцій, що перекачують опади, після кожної зупинки насосів промивають водою, щоб запобігти випаданню осаду і закупорювання їм трубопроводу [13].

4.4 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики під час воєнного стану

Сьогодні внаслідок воєнної агресії Росії енергетичний сектор України зазнав відчутних втрат, хоча критичного дефіциту енергоресурсів та енергоносіїв не відчувається, і можна говорити про підтримання необхідного рівня безпеки економіки й життєдіяльності суспільства. Проте, безумовно, посилюються ризики і з'явилися нові виклики для стійкого функціонування та розвитку енергетики. Тому зараз важливими є оцінка і закладення фундаменту для реконструкції та модернізації енергетики майбутнього з урахуванням того, що частина об'єктів енергетичної інфраструктури була зруйнована або пошкоджена. При цьому

бажано використовувати досвід країн ЄС та їх найкращі практики з реконструкції і модернізації сфери енергетики.

З урахуванням можливих сценаріїв, глибини та тривалості війни, можливістю її повторення в майбутньому, а також, виходячи з аналізу діючого стану енергетики та її потенціалу, новою енергетичною стратегією України повинно бути запропоновано досягнення наступних цілей:

- відновлення та відбудова української енергетики згідно новітніх технологій сталого розвитку та енергонезалежності;
- залучення новітніх технологій, стратегічних партнерів та інвесторів в енергетику України;
- досягнення профіциту енергетичного балансу енергетичних ресурсів та його поступового нарощення;
- реструктуризація паливно-енергетичного комплексу від видобутку та генерації, до постачання, зберігання, реалізації енергетичних ресурсів з урахуванням викликів енергетичної безпеки та війни, з можливістю оперативного відновлення пошкоджень та руйнувань, кризового управління енергетикою;
- диверсифікація поставок енергетичних ресурсів;
- збільшення частки відновлювальної енергетики, розвиток енергетики, біопалива, сонячної, гідро-, термо- та вітрової енергетики;
- забезпечення цілей сталого розвитку енергетики;
- мінімізація втрат енергетичних ресурсів;
- розвиток водневих технологій і стратегії розвитку «зеленого» водню зокрема;
- розвиток енергозберігаючих, енергетичних технологій, пошук нових джерел енергії, підвищення ефективності діючих технологій, задіяння невикористаного чи неефективно використовуваного потенціалу;
- впровадження енергоефективних та енергозберігаючих технологій в промисловості та побуті;

- розвиток атомної енергетики, зокрема, подовження роботи діючих реакторів, будівництво нових, в тому числі, малих ядерних реакторів;
- пошук родовищ та видобуток нетрадиційних газів (сланцевий, газогідрати);
- збільшення видобутку нафти, газу, вугілля;
- збільшення захисту існуючих об'єктів великої потужності;
- розвиток технологій зберігання і транспортування енергії;

Серед вище перелічених пунктів стратегії модернізації енергетичного сектору можна виділити наступні основні методи підвищення надійності енергосистем:

1. Децентралізація та реструктуризація системи електропостачання. У сучасних умовах геополітичної нестабільності та загроз з боку РФ, важливість розгляду та впровадження ефективних стратегій для реструктуризації систем електропостачання набуває критичного значення. Розглядаючи використання розподіленої генерації енергії та систем накопичення, важливим є розроблення комплексної стратегії, спрямованої на підвищення стійкості та надійності електропостачання в умовах можливих атак.

Однією з ключових стратегій є перехід від централізованих систем генерації до розподіленої генерації, що дозволяє створити мережу менших об'єктів з внутрішньою самостійністю. Це зменшує вразливість системи в цілому, оскільки у випадку атаки чи збою в одній частині, інші можуть продовжувати функціонувати. Крім того, використання систем накопичення енергії дозволяє компенсувати коливання виробництва електроенергії та забезпечує резервне живлення під час аварій.

У контексті об'єктів, які є потенційними мішенями для атак, важливо виділити критично важливі об'єкти, такі як медичні установи, важливі технологічні підприємства та інші об'єкти з високим рівнем важливості для суспільства. Для них слід розглядати використання автономних систем енергопостачання, які можуть функціонувати незалежно від централізованої

мережі та забезпечувати стійке електроживлення навіть у випадку обмежень чи атак на основні електромережі.

Розгалужена система електропостачання дозволяє забезпечити додатковий рівень захисту, розділяючи мережу на різні сегменти та забезпечуючи можливість локалізації проблем та їх швидкого виправлення без впливу на інші частини системи.

Застосування новітніх технологій та інтелектуальних систем управління генерацією і розподілом енергії може покращити ефективність системи в цілому, а також дозволить вчасно виявляти та реагувати на можливі загрози або аномалії у роботі.

Розробка та впровадження цілісної стратегії, що поєднує розподілену генерацію, системи накопичення енергії та розгалужену систему електропостачання, стане важливим кроком у забезпеченні стійкості та ефективності електроенергетичної інфраструктури в умовах сучасних загроз.

2. Збільшення частки відновлювальної електроенергетики. Питання збільшення частки відновлювальної енергетики виявляється критичним для підвищення стійкості роботи енергосистеми та забезпечення балансування енергетичного споживання та виробництва. Оскільки об'єкти «зеленої енергетики» важко піддати пошкодженням, вони стають ефективним інструментом для забезпечення надійності та стабільності енергетичних систем.

Відновлювальні джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, використовують природні ресурси, які є бездоганно доступними та необмеженими. Це робить не вразливими до збурень у постачанні палива, що часто є проблемою для традиційних джерел енергії.

Збільшення частки відновлювальної енергетики допомагає зменшити викиди парникових газів і забруднення, сприяючи екологічній стійкості та зменшенню впливу на здоров'я людей та екосистему.

Використання розподіленої генерації, що часто пов'язане з відновлювальною енергією, сприяє гнучкості енергосистеми. Децентралізовані

об'єкти можуть продовжувати генерувати енергію навіть у випадку витоку підключених об'єктів, забезпечуючи ефективнішу стійкість системи.

Зростання частки відновлювальних джерел енергії також сприяє що допомагає справлятися з викликами сучасності та створює стійку енергетичну інфраструктуру. Таким чином, перехід до відновлювальних джерел енергії є ключовим аспектом стабілізації та покращення ефективності енергетичних систем.

3. Впровадження малих модульних атомних реакторів (ММАР) обіцяє значну перевагу у надійності та стійкості електропостачання у короткостроковій перспективі.

Відмітною особливістю ММАР є їх менший розмір та модульна конфігурація, що дозволяє їх розташовувати ближче до споживачів, включаючи важкодоступні або віддалені регіони. Це сприяє зменшенню втрат та зниженню ризиків, пов'язаних з довгими лініями передачі.

Ще одна перевага полягає в тому, що ММАР можуть працювати як автономні системи або синхронізуватися з централізованою мережею. Це дозволяє їм функціонувати як резервні джерела енергії, які можуть швидко включатися в разі проблем у основній системі.

Введення ММАР стає ключовим кроком у напрямку створення стійкої та гнучкої системи електропостачання, що відповідає сучасним викликам та вимогам споживачів.

Забезпечення енергетичної безпеки України потребує комплексного підходу та впровадження ефективних заходів на державному та міжнародному рівнях.

Реалізація запропонованих стратегічних кроків, які включають децентралізацію та реструктуризацію системи електропостачання, збільшення частки використання відновлювальних джерел енергії, створення системи захисту, диверсифікацію поставок та імплементацію європейських стандартів, сприятиме зміцненню незалежності та стійкості енергетичної системи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Підсумки виконаних досліджень

1. Створена комп'ютерна модель системи "ПЧ – АД з короткозамкненим ротором – насос" дозволяє визначити таку фазну напругу, при якій модуль фазного струму електричного двигуна досягає мінімуму. Це сприяє зменшенню споживання електроенергії і дозволяє виявити закономірності зміни струму фази при зміні частоти струму в живильній мережі. Застосування регулювання напруги забезпечує незмінним час пуску, але при цьому струм зменшується на 7%.

2. Використання комп'ютерного моделювання для системи "ПЧ – АД з короткозамкненим ротором – насос" підтверджує, що застосування адаптивного методу управління перетворювачем частоти дозволяє досягти збереження електроенергії при ступенях регулювання від 10 і більше. Зі зменшенням ступенів регулювання спостерігається збільшення споживання електроенергії.

3. Під час проведення експериментальних досліджень з метою зменшення енергоспоживання було виявлено, що при зміні напруги при постійній частоті мережі живлення фазний струм статора скорочується на 5–7%, а оберти електродвигуна зменшуються на 45...85 об/хв при пониженні тиску в трубопроводі системи водопостачання на 3...5%. Це призводить до ефективного зниження енергоспоживання. Паралельно спостерігається підвищення коефіцієнта потужності при зменшенні реактивної потужності, що покращує енергетичні характеристики.

Щодо рекомендацій та перспектив подальшого розроблення теми, пропонується дослідити перетворювачі частоти з адаптивним способом керування для інших об'єктів керування (таких як транспортери, норії тощо), які використовуються в інших процесах життєзабезпечення та продуктивності тварин, а також для об'єктів рослинництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6–7 груд. 2023.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – С. 254
2. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод. Навч. посібник. – Рівне: НУВГП, 2010. – 238 с.
3. Буняк О. А. Електричні машини [Електронний ресурс]: // Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ID 812): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2011. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua/users/index.php>.
4. Електродвигун 1,5 кВт 3000 об/хв [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zemo.com.ua/catalog-el-motors/elektrodvyhun-1-5-kvt-3000-ob-hv>
5. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: підручник / за ред. М. Г. Поповича і О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. – 780 с.
6. Загірняк М. В. Електричні машини: підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – 2-ге вид., перероб. і доповн. – Київ : Знання, – 2009. – 399 с.
7. Ковальчук О. В., Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ : Либідь, – 2007. 656 с.
8. Коренькова Т.В., Михайличенко Д.А. та ін. Дослідження системи ПЧ-АД-Насос-Гідромережа. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 2/2003 (19), с. 377-382.
9. Костишин В.С. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу / В.С. Костишин, І.І. Яремак// Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. –2017. –№ 1. –С. 50-60.
10. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.

11. О. А. Худяєв, І. В. Обруч, Л. В. Асмолова. Частотне керування асинхронним електроприводом : навч. посібник / О. А. Худяєв, І. В. Обруч, Л. В. Асмолова. – Харків : Право, 2023. – 250 с.

12. Основи охорони праці: підручник / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний [та ін.] ; за ред. К. Н. Ткачука. - 2-ге вид., допов. і перероб. – К.: Основа, 2006. – 444 с.

13. Протоєрейський О. С. Охорона праці в галузі: навч. посіб. / О. С. Протоєрейський, О. І. Запорожець. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 268с.

14. Improving pumping system performance [Електронний ресурс] – 2006 – Режим доступу: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/pump.pdf>.

15. Variable speed control of a pump [Електронний ресурс] – 2021 – Режим доступу: <https://www.pumpsaudit.com/speed-control-of-pumps?lang=eng>.