

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських
технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Артем РУХЛОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у
металургії та гірництві»
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка (G3 Електрична інженерія)
на тему «**Модернізація системи керування пуском електродвигунів
насосів високого тиску мартенівського цеху**»

Керівник роботи

Юрій ШРАМКО

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними.*

Здобувач

Роман МІСЮРА

| | | | |
|--------------------------------|--|--|--|
| Підсумкова оцінка за атестацію | | | |
|--------------------------------|--|--|--|

Голова ЕК

Денис КОНОНЮК

Запоріжжя 2026



| | |
|----------------------|--|
| | ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» |
| Факультет | автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських технологій |
| Кафедра | автоматизації, електро- та робототехнічних систем |
| Ступінь вищої освіти | бакалавр |
| Спеціальність | 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (G3 Електрична інженерія) |
| ОПП | Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві |

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Артем РУХЛОВ

02.03.2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Місюри Романа Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Модернізація електроприводу насосу високого тиску насосної станції охолодження мартенівських печей ПАТ «Запоріжсталь»
керівник роботи Шрамко Юрій Юрійович, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету від 23.02. 2026 р. №41/23.02.2026
2. Термін подання роботи 12.06.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» м.Запоріжжя, результати власних експериментів та досліджень тощо
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, технологічний процес, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції, постановка задач з підвищення енергоефективності роботи насосної станції технологічного водопостачання). 2. Спеціальний розділ: обґрунтування вибору системи регульованого електроприводу на базі перетворювача частоти; вибір та розрахунок елементів електроприводу і засобів вимірювання; дослідження режимних параметрів роботи при частотному регулюванні; розробка алгоритмів керування та захистів; структурні/принципові рішення та заходи ЕМС). 3. Економічне обґрунтування запропонованих заходів. 4. Безпека праці у предметній області. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.
5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Електрична силова схема живлення електродвигуна, силова схема перетворювача частоти для керування асинхронним електродвигуном з коротко замкнутим ротором проєктуємого електроприводу

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта |
|---|---|
| Аналіз предметної області | доц. Шрамко Ю.Ю. |
| Спеціальний розділ | доц. Шрамко Ю.Ю. |
| Економічне обґрунтування запропонованих заходів | доц. Шрамко Ю.Ю. |
| Безпека праці у предметній області | доц. Шрамко Ю.Ю. |

7. Дата видачі завдання 05.12.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи |
|-------|---|--------------------------------|
| 1 | Розділ 1. Аналіз предметної області | 13.04.26 |
| 2 | Розділ 2. Спеціальний розділ | 27.04.26 |
| 3 | Розділ 3. Економічне обґрунтування запропонованих заходів | 18.05.26 |
| 4 | Розділ 4. Безпека праці у предметній області | 25.05.26 |
| 5 | Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат | 08.06.26 |
| 6 | Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат | 09.06.26 |
| 7 | Остаточне оформлення роботи та графічного (презентаційного) матеріалу | 10.06.26. |
| 8 | Рецензування завершеної роботи. Захист | 25.06.26 |

Здобувач

Роман МІСЮРА

Керівник роботи

Юрій ШРАМКО



АНОТАЦІЯ

Місюра Роман Олександрович. Модернізація системи керування пуском електродвигунів насосів високого тиску мартенівського цеху. 118 сторінок машинописного тексту, 35 рисунків, 7 таблиць, 19 джерел. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електроніка та електромеханіка (G3 Електрична інженерія). ОПП «Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві». ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження: електротехнічний комплекс та система керування пусковими режимами приводних електродвигунів насосних агрегатів високого тиску в умовах мартенівського виробництва.

Предмет дослідження: технологічні та електромагнітні процеси функціонування насосної станції високого тиску, що забезпечує циркуляцію теплоносія в контурах охолодження конструктивних вузлів та сталеплавильних агрегатів мартенівського цеху.

Мета роботи: розробка та обґрунтування технічних рішень щодо модернізації пускової апаратури та контурів регулювання електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху шляхом інтеграції сучасного перетворювача частоти.

У першому розділі здійснено аналітичний огляд стану досліджуваної предметної області та обґрунтовано необхідність реконструкції об'єкта.

Другий розділ присвячено теоретичному обґрунтуванню, розрахунку та вибору силових елементів частотного перетворювача і структури системи автоматичного керування.

У третьому розділі наведено детальні техніко-економічні розрахунки, що підтверджують фінансову доцільність впровадження розроблених рішень.

Четвертий розділ містить аналіз питань охорони праці, промислової безпеки та виробничої санітарії при експлуатації проектного електрообладнання.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД, НАСОСНА СТАНЦІЯ ВИСОКОГО ТИСКУ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| ВСТУП..... | 6 |
| 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ..... | 8 |
| 1.1 Насосна станція високого тиску мартенівського цеху..... | 8 |
| 1.2 Системи запуску електродвигунів..... | 14 |
| 1.3 Високовольтні та низьковольтні електродвигуни..... | 18 |
| 1.4 Аналіз недоліків роботи системи та обґрунтування необхідності її модернізації..... | 20 |
| 1.5 Різновиди частотних перетворювачів..... | 22 |
| 1.6 Функціональні переваги частотного регулювання електроприводів..... | 47 |
| 1.7 Сучасні тенденції та інновації в галузі частотних перетворювачів..... | 49 |
| 2 Спеціальний розділ..... | 52 |
| 2.1 Розрахунок потужності на валу насоса..... | 52 |
| 2.2 Розрахунок і вибір елементів системи керування перетворювача частоти..... | 53 |
| 2.2.1 Визначення номінальних параметрів випрямляча..... | 54 |
| 2.2.2 Визначення параметрів та вибір струмообмежувального реактора..... | 54 |
| 2.2.3 Визначення параметрів та вибір силових елементів тиристорно-діодного модуля випрямляча..... | 55 |
| 2.2.4 Обчислення струму силового вентиля..... | 55 |
| 2.2.5 Визначення напруги вентилів модуля..... | 56 |
| 2.2.6 Визначення параметрів та вибір елементів RC-кола..... | 60 |
| 2.2.7 Розрахунок параметрів захисного резистора..... | 62 |
| 2.2.8 Розрахунок основних параметрів варистора та його вибір..... | 63 |
| 2.2.9 Вибір і розрахунок параметрів конденсаторного фільтра..... | 64 |
| 2.2.10 Визначення параметрів та вибір силового транзистора..... | 65 |
| 2.3 Дослідження режимних параметрів роботи при частотному регулюванні..... | 66 |
| 2.4 Алгоритм та організація експериментальних досліджень..... | 77 |
| 2.5 Моделювання системи ЧПД для насосів..... | 84 |
| 2.5.1 Спрощена модель асинхронного двигуна..... | 106 |
| 3 РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІКИ..... | 108 |
| 3.1 Аналіз електроспоживання насосної станції..... | 108 |
| 3.2 Економічний розрахунок..... | 110 |
| 4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ..... | 112 |
| 4.1 Аналіз небезпек при експлуатації електромеханічного обладнання..... | 112 |
| 4.2 Розробка заходів із захисту персоналу..... | 113 |
| ВИСНОВКИ..... | 115 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 117 |



ВСТУП


Імперативи сьогодення щодо суттєвого зниження питомих енерговитрат та раціонального використання матеріально-сировинних ресурсів у металургійному секторі промисловості зумовлюють потребу в безперервній оптимізації та модернізації наявних технологічних циклів. Гідротехнічні комплекси високого тиску, які інтегровані в загальну інфраструктуру мартенівського цеху, виконують критично важливу функцію безперебійного підтримання заданого тиску й циркуляції теплоносія в охолоджувальних контурах сталеплавильних агрегатів. Водночас переважна більшість таких об'єктів наразі експлуатується із морально та фізично застарілою комутаційною апаратурою прямого чи реакторного пуску приводних електричних машин. Це призводить до надмірних втрат активної потужності, виникнення небезпечних гідроударів у магістралях, значних пускових струмів в електричних мережах та суттєвого подорожчання планового сервісного обслуговування.

В умовах воєнного стану в Україні вектори енергозбереження та підвищення живучості промислової інфраструктури набувають стратегічного значення. Систематичні пошкодження об'єктів енергетичної генерації та дефіцит маневрових потужностей вимагають впровадження жорстких режимів економії паливно-енергетичних ресурсів безпосередньо на великих промислових споживачах. У зв'язку з цим переорієнтація силових приводів насосних агрегатів на регульований режим роботи за допомогою пристроїв силової електроніки виступає дієвим і критично необхідним інструментом, що дозволяє кардинально скоротити обсяги енергоспоживання, стабілізувати динамічні процеси в гідросистемах та гарантувати безвідмовність основного обладнання.

Мета дослідження полягає у науково-технічному обґрунтуванні, розробці та практичній реалізації інженерних рішень із модернізації пускових контурів та систем автоматичного регулювання швидкості електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху на основі впровадження частотно-регульованого привода. Досягнення поставленої мети дозволить оптимізувати енергетичний баланс підприємства, мінімізувати комутаційні збурення в живильній мережі, пролонгувати міжремонтний інтервал гідросилового обладнання та знизити експлуатаційні витрати.

Для досягнення цієї мети у роботі поставлено та вирішено такі завдання:

- виконати детальний технічний аудит та аналіз режимів функціонування чинної схеми пуску високовольтних електродвигунів насосної станції;
- дослідити теоретичні закономірності та принципи формування напруги в сучасних інверторних топологіях, а також оцінити їхній вплив на електромеханічні характеристики приводних машин;

- 
- розробити спеціалізовану програму і методику проведення експериментальних досліджень для верифікації ефективності частотного регулювання;
 - сформулювати технічні вимоги та здійснити вибір комплексу апаратури, силових модулів і контрольно-вимірювальних приладів для реалізації дослідної схеми;
 - виконати комплекс експериментів, здійснити математичну обробку та аналітичну інтерпретацію отриманих результатів;
 - провести розрахунок техніко-економічних показників проекту з визначенням чистого фінансового ефекту та терміну окупності капіталовкладень.

Методологічну основу роботи становлять методи фундаментального теоретичного аналізу положень електротехніки та теорії електропривода, математичне моделювання процесів у напівпровідникових перетворювачах, проведення натурних та стендових експериментів, а також методи інженерно-економічного аналізу та математичної статистики.

Кваліфікаційна праця побудована за модульним принципом і складається зі вступу, чотирьох логічно пов'язаних розділів, загальних висновків та бібліографічного переліку використаних джерел.

Наукова та практична цінність роботи полягає у розробці комплексного інженерного підходу до підвищення енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності промислових гідротехнічних споруд за допомогою засобів силової напівпровідникової техніки. Запропоновані алгоритми контурів керування забезпечують суттєву економію активної потужності та нівелюють динамічні удари в кінематиці. Сформовані у роботі методичні та практичні рекомендації мають універсальний характер і можуть слугувати базою для аналогічної модернізації інших електроприводів змінного струму в суміжних секторах промисловості, де вимагається гнучке й точне регулювання параметрів потоку рідин.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Насосна станція високого тиску мартенівського цеху

У мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь» функціонують сім стаціонарних мартенівських печей місткістю 500 тонн кожна, а також один двованний сталеплавильний агрегат, кожна ванна якого розрахована на 250 тонн рідкого металу.

Безперервний технологічний цикл виплавки сталі вимагає інтенсивного та надійного охолодження конструктивних елементів печей і допоміжного обладнання двованного агрегату. Подача охолоджувальної води до теплообмінних контурів забезпечується спеціалізованою насосною станцією [1]. Загальна схема та розташування ключових водоохолоджувальних елементів мартенівських печей наведені на рис. 1.1.

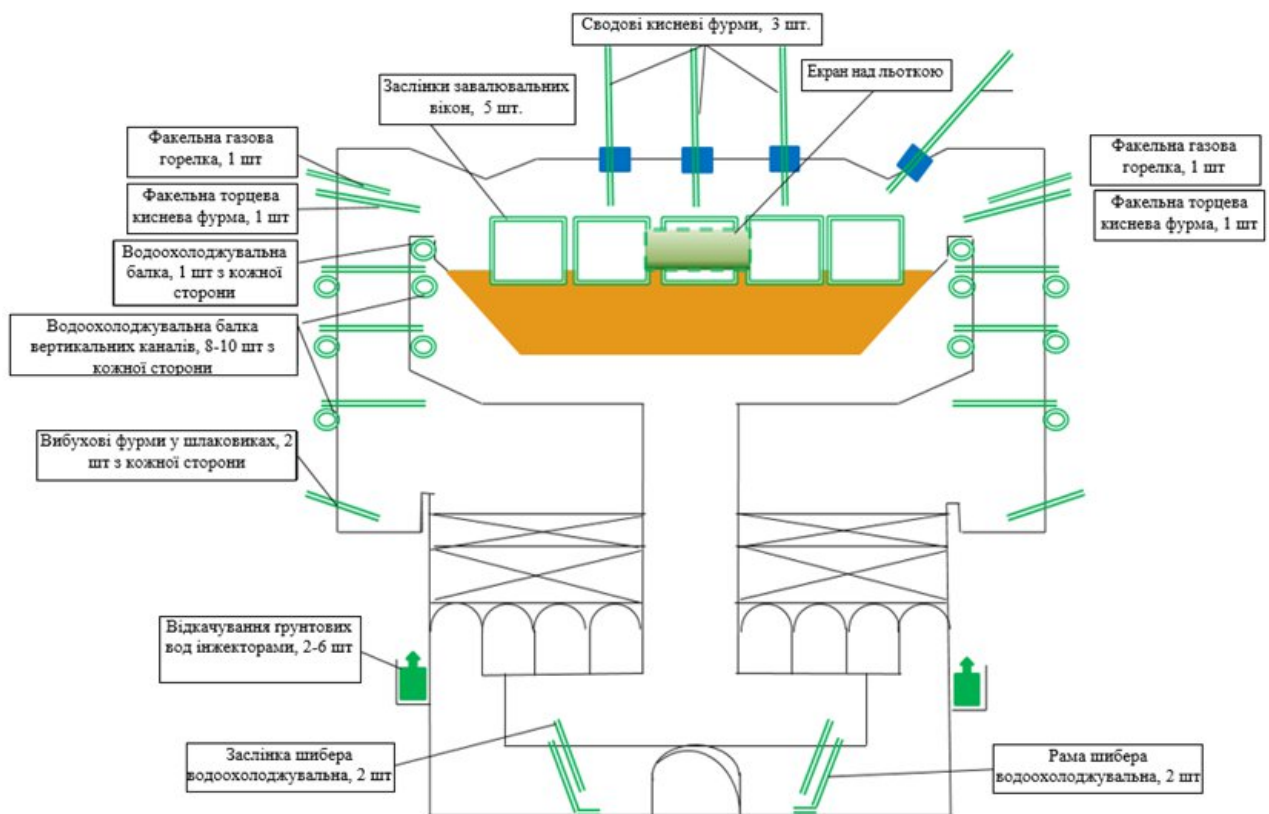


Рисунок 1.1 – Елементи системи водяного охолодження мартенівських печей

Насосна станція мартенівського цеху (рис. 1.2) призначена для безперервної подачі охолоджувальної води до конструктивних вузлів мартенівських печей та двованного сталеплавильного агрегату (ДСПА). Робочі параметри гідравлічної системи передбачають забезпечення заданої продуктивності на рівні 621 м³/год для одного насосного агрегату при створенні тиску 7,5 кг/см² у загальному скидному колекторі. При цьому

мінімально необхідний рівень тиску безпосередньо на печах має становити 5 кг/см², що є критично важливим для стабільного охолодження кисневих фурм, температура вихідної води яких за технологічним регламентом не повинна перевищувати 60 °С. Додатковою функцією станції є забезпечення відкачування ґрунтових вод за допомогою інжекторних установок із глибини до 12 метрів [2,3].



Рисунок 1.2 – Насосна станція системи водопостачання мартенівського виробництва

Насосні агрегати оснащені насосами двох типів, технічні характеристики яких наведені в таблиці 1.1, а також комплектуються двома різними типами електродвигунів.

Таблиця 1.1 – Характеристики насосів

| Тип насоса | Тип двигуна | Потужність, кВт | Подача, м ³ /год | Напір, м | Частота обертів, об/хв | ККД, % | Кількість, шт |
|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------------------|----------|------------------------|--------|---------------|
| Насос 8НДВ-90 | А-113-4 | 250 | 600 | 90 | 1500 | 77 | 4 |
| Насос WILO SCP 200/460HA | A4-355L-4 | 250 | 620 | 70 | 1470 | 88 | 2 |

Відцентровий насос типу 8НДВ належить до класу динамічного гідросилового обладнання горизонтального виконання. Цей

одноступеневий агрегат оснащений робочим колесом двостороннього входу, що забезпечує осьове гідравлічне балансування ротора та високу кавітаційну стійкість при перекачуванні великих об'ємів води. Базова конструктивна архітектура насоса об'єднує в собі литий корпус, знімну кришку, безпосередньо робоче колесо, силове вал, а також герметизуючі вузли ущільнення та підшипникові опори, які сприймають радіальні навантаження. Для запобігання витокам середовища та підсмоктуванню повітря застосовано класичне сальникове ущільнення вала, а для стабілізації його роботи реалізовано контур гідравлічного затвора, куди затворна рідина подається через спеціальні внутрішні канали у кришці насоса.

Конструктивне креслення насоса 8НДВ згідно з технічним паспортом наведено на рис. 1.3.

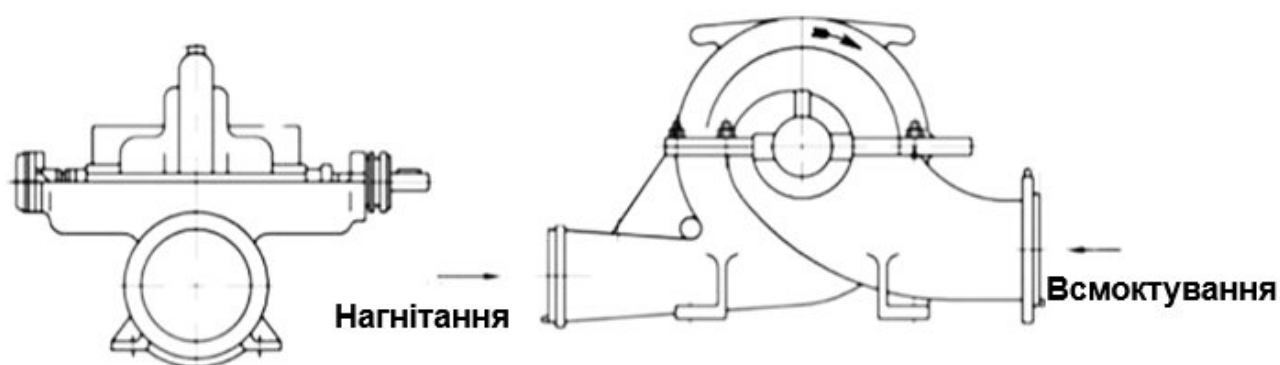


Рисунок 1.3 – Конструктивне креслення насоса 8НДВ

Робочі характеристики насоса 8НДВ при частоті обертання вала 1500 об/хв наведені на рис. 1.4.

Відцентровий насос серії WIL0 SCP 200/460HA є високоефективним одноступеневим гідравлічним агрегатом нормально всмоктувального типу, виконаним у конфігурації з аксіально розділеним корпусом. Ключова конструктивна особливість цієї архітектури полягає в тому, що литий корпус спіральної форми розділений на дві симетричні частини (верхню та нижню) вздовж горизонтальної осі вала. Ця особливість дозволяє проводити технічний огляд, обслуговування або заміну елементів роторної групи без демонтажу всього насоса з трубопроводу чи від'єднання від електродвигуна, оскільки обидві половини корпусу надійно з'єднані між собою за допомогою різьбових гвинтів. Висока герметичність стику між сполучними фланцями обох частин забезпечується за рахунок спеціального каліброваного паперового ущільнення.

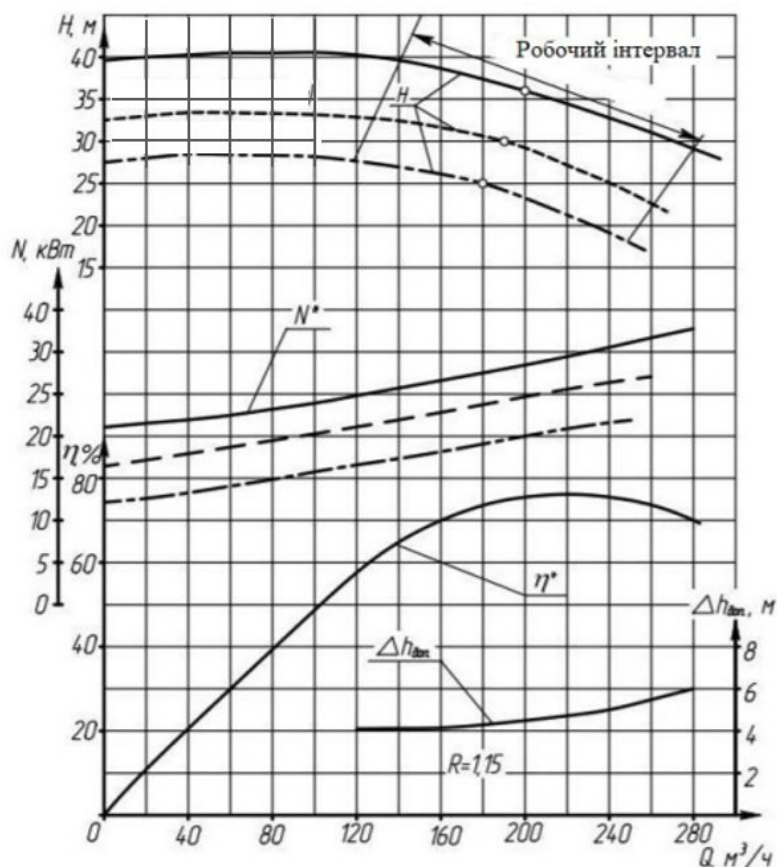


Рисунок 1.4 – Робочі параметри насоса 8НДВ

Завдяки специфіці своєї геометрії та високим показникам надійності, насосні агрегати з аксіально розділеним корпусом є базовим вибором для капіталомістких промислових та інженерних систем. Найбільш активно вони залучаються у великомасштабних комплексах водопостачання та водовідведення, замкнених технологічних контурах охолодження металургійного й енергетичного обладнання, а також у системах осушення й видалення залишків технологічних вод. Окрім того, дане обладнання демонструє стабільну роботу при циркуляції теплоносіїв в охолоджувальних ставках і промислових системах кондиціонування, на великих муніципальних станціях водоочищення, а також у потужних спринклерних контурах, установках крапельного зрошення та автоматизованих системах пожежогасіння високого тиску.

Конструктивне креслення насоса WILO SCP 200/460HA відповідно до технічної документації наведено на рис. 1.5.

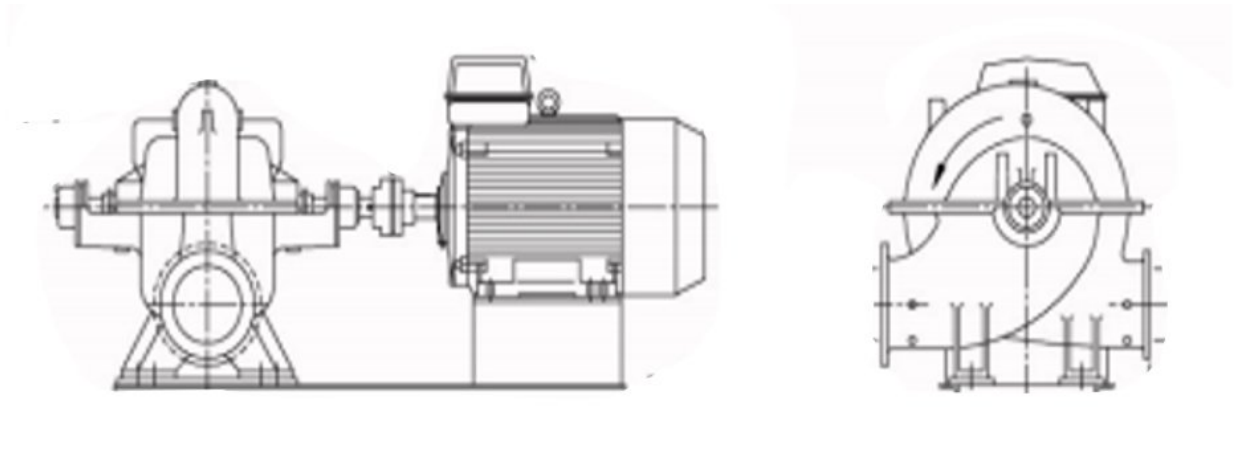


Рисунок 1.5 – Конструктивна схема насоса WILO SCP 200/460HA

Робочі характеристики насоса WILO SCP 200/460HA наведені на рис. 1.6.

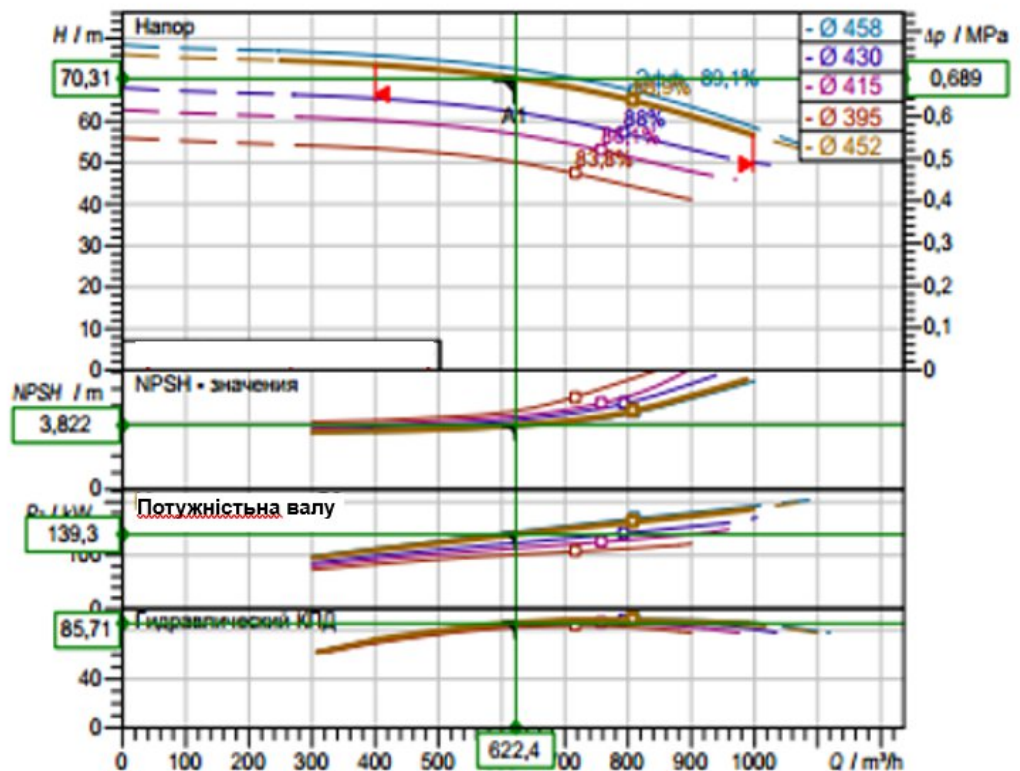


Рисунок 1.6 – Робочі характеристики насоса WILO SCP 200/460HA

Насосний агрегат включає насос, передавальний механізм і електропривод. Як привід для роботи насоса застосовуються високовольтні електродвигуни типу А-113-4 та А4-355L-4 (рис. 1.7).



а) електродвигун серії
А-113-4



б) електродвигун серії
А4-355L-4

Рисунок 1.7 – У насосних агрегатах як приводні елементи використовуються електродвигуни серій А-113-4 та А4-355L-4

На сьогодні система запуску електродвигунів насосної станції реалізована за схемою прямого пуску від мережі (рис. 1.8). У такому випадку двигуни вмикаються безпосередньо до джерела живлення, що спричиняє виникнення підвищених пускових струмів і значних механічних навантажень на елементи обладнання.

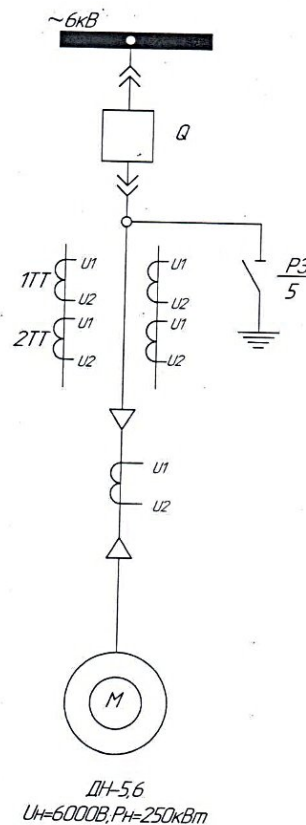


Рисунок 1.8 – Схема електроживлення електродвигуна

Такий спосіб запуску має ряд істотних недоліків. Пусковий струм у цьому випадку може перевищувати номінальне значення у 5–7 разів, що створює значне навантаження на електричну мережу та супроводжується підвищеними втратами електроенергії.

Крім того, значні пускові струми разом із механічними навантаженнями прискорюють зношування електродвигунів і насосного обладнання, що призводить до скорочення їхнього ресурсу та збільшення витрат на обслуговування. Також прямий пуск викликає перехідні процеси в електричній мережі, які можуть негативно впливати на стабільність роботи всієї енергосистеми.

1.2 Системи запуску електродвигунів

Прямий пуск (Direct On-Line, DOL) належить до найбільш розповсюджених способів запуску асинхронних електродвигунів (рис. 1.9). У цьому випадку двигун під'єднується до електричної мережі безпосередньо, без використання додаткових пускових пристроїв.

Прямий пуск характеризується простотою та швидкістю реалізації, оскільки не потребує використання складних схем керування або додаткових пускових пристроїв. Водночас у момент запуску значення пускового струму може у 5–7 разів перевищувати номінальний, що створює підвищене навантаження на електричну мережу. Електродвигун при цьому майже миттєво досягає номінальної частоти обертання [4].

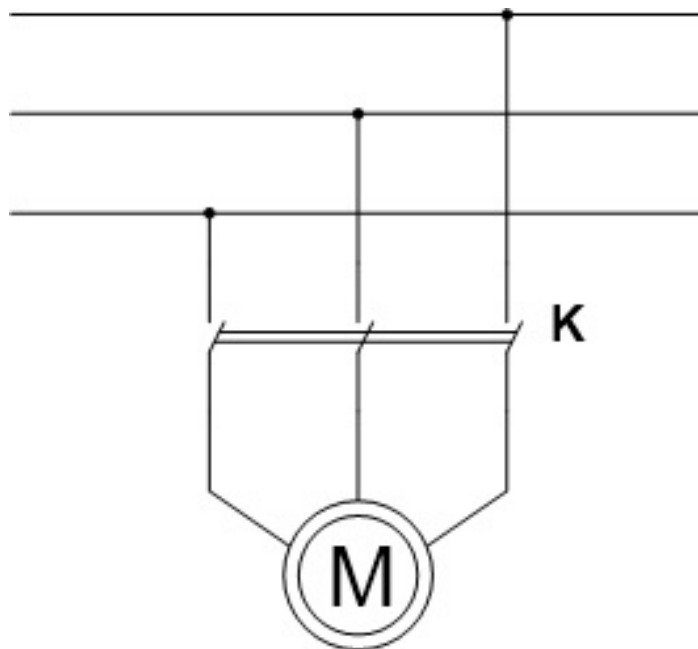


Рисунок 1.9 – Електрична схема прямого запуску асинхронного електродвигуна

Система прямого запуску характеризується простотою монтажу та експлуатації, оскільки не потребує застосування додаткових пристроїв

керування, таких як контактори чи контролери, що спрощує як встановлення, так і подальше обслуговування.

До основних недоліків прямого пуску належать:

~ значні пускові струми, які можуть спричинити перевантаження електричної мережі та негативно впливати на роботу інших споживачів, підключених до тієї ж системи живлення;

~ підвищені пускові струми та електромеханічні навантаження, що призводять до інтенсивнішого зношування механічних частин двигуна та скорочують термін його служби;

~ обмежена придатність для приводу важких механізмів та обладнання, яке потребує плавного пуску або регулювання швидкості.

Альтернативним способом запуску асинхронних електродвигунів є пуск зі зниженою напругою, який дозволяє зменшити пусковий струм і механічні навантаження. До таких методів належать схеми «зірка–трикутник» та запуск через автотрансформатор.

При використанні схеми «зірка–трикутник» електродвигун спочатку підключається за схемою зірки, що забезпечує зниження прикладеної напруги. Після розгону до певної частоти обертання відбувається перемикання на схему трикутника для подальшої роботи в номінальному режимі, як показано на рисунку 1.10.

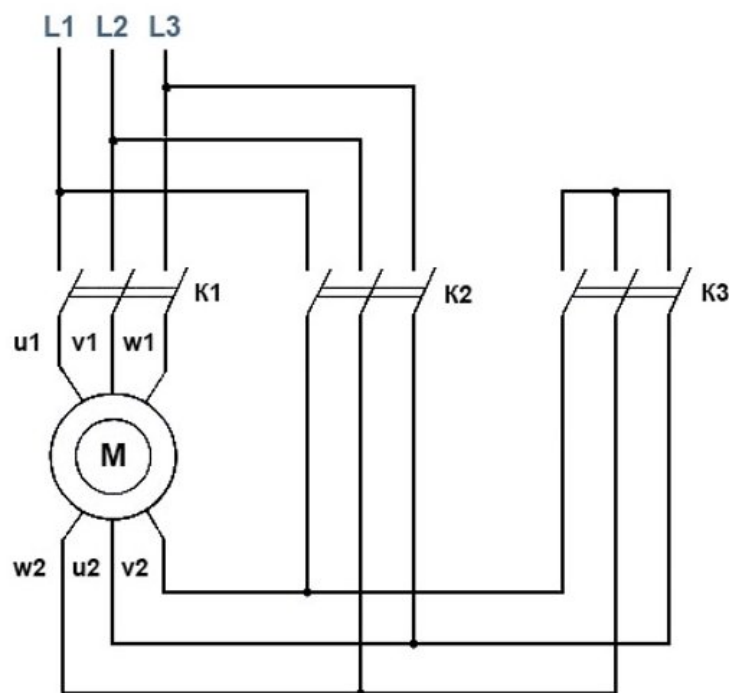


Рисунок 1.10 – Схема пуску асинхронного електродвигуна «зірка–трикутник»

Перевагою даного способу запуску є зменшення пускового струму приблизно до 30% від значення прямого пуску, що дозволяє знизити

навантаження на електродвигун і, відповідно, сприяє збільшенню його ресурсу роботи.

До недоліків належать більш складна схема підключення, а також обмежена ефективність застосування для двигунів малої потужності чи установок, де передбачаються часті пуски.

У схемі запуску асинхронного електродвигуна через автотрансформатор використовується автотрансформатор, який знижує напругу, що подається на двигун у момент пуску (рис. 1.11).

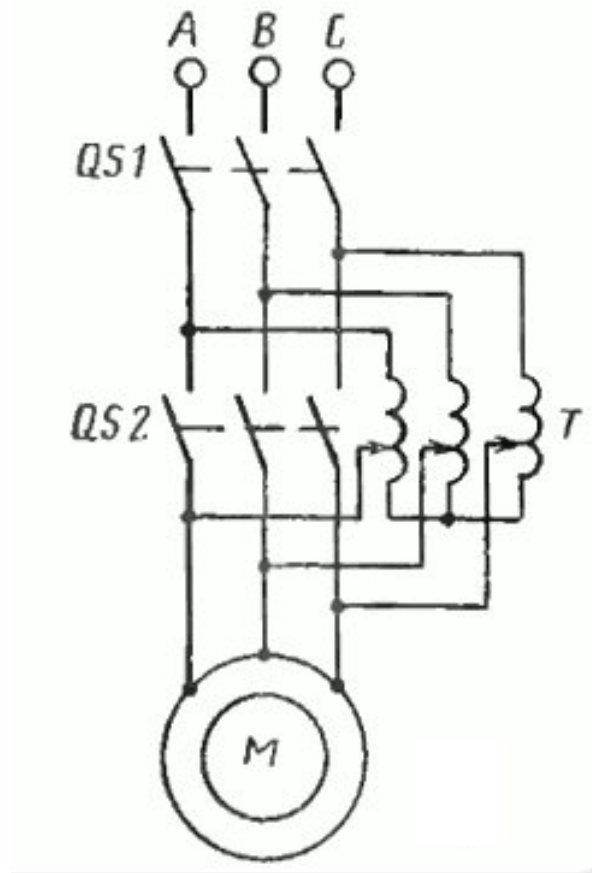


Рисунок 1.11 – Схема запуску електродвигуна через автотрансформатор

Перевагами даної системи є можливість гнучкого регулювання ступеня зниження напруги, що дозволяє адаптувати режим пуску до конкретних умов роботи, а також зменшення пускового струму.

До недоліків належать підвищена вартість обладнання через необхідність використання автотрансформатора, а також більш складний монтаж і налаштування системи.

До основних переваг пуску електродвигуна при зниженій напрузі належать:

суттєве обмеження величини пускового струму, що дозволяє зменшити навантаження на електричну мережу та запобігти її перевантаженню;

~ зменшення механічних навантажень на елементи електродвигуна під час запуску, що позитивно впливає на надійність роботи та збільшує термін його експлуатації.

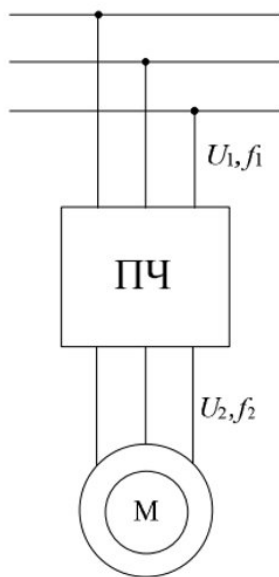
Разом з тим, даний спосіб пуску має певні недоліки:

~ необхідність використання додаткового обладнання, що ускладнює схему керування та збільшує витрати на її реалізацію;

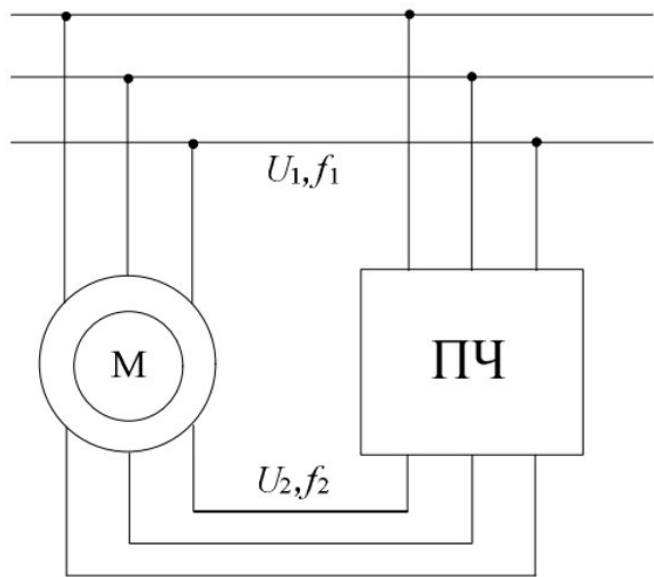
~ потреба у точному налаштуванні системи та контролі режимів перемикання для забезпечення коректної роботи електроприводу.

Сучасні електронні системи запуску електродвигунів набувають широкого застосування завдяки можливості забезпечення плавного пуску, обмеження величини пускових струмів та ефективного керування режимами роботи електродвигуна. У таких системах, як правило, застосовуються різні способи регулювання, зокрема зміна напруги живлення та частоти струму [5].

Система частотного регулювання електропривода (VFD) забезпечує зміну частоти та величини напруги, що подається на електродвигун, завдяки чому досягається плавний пуск і зупинка привода. Існує декілька варіантів схем підключення частотних перетворювачів, які наведені на рисунку 1.12.




а) підключення перетворювачів між мережею живлення та статорною обмоткою



б) підключення перетворювачів між роторною обмоткою та мережею живлення

Рисунок 1.12 – Варіанти схем підключення частотних перетворювачів

До основних переваг системи частотного регулювання електропривода належать зменшення величини пускового струму та можливість точного керування швидкістю обертання електродвигуна, що забезпечує підвищення ефективності його роботи в різних експлуатаційних режимах.



Недоліками таких систем є відносно висока вартість обладнання, а також додаткові витрати, пов'язані з монтажем, налаштуванням та введенням системи в експлуатацію.

Системи м'якого пуску призначені для обмеження пускового струму та забезпечення плавного збільшення напруги під час запуску електродвигуна. Їх застосування дозволяє зменшити механічні навантаження на елементи електропривода, а також спрощує процес монтажу та налаштування порівняно із системами частотного регулювання (VFD). Разом з тим, системи м'якого пуску не забезпечують можливості регулювання швидкості обертання двигуна в процесі його роботи.

Електронні системи запуску мають суттєві переваги при керуванні асинхронними електродвигунами, зокрема сприяють зниженню енергоспоживання та покращенню експлуатаційних характеристик обладнання. Вибір конкретного способу пуску визначається умовами експлуатації, особливостями технологічного процесу та економічною доцільністю застосування системи.

1.3 Високовольтні та низьковольтні електродвигуни


Високовольтними називають електродвигуни, робоча напруга яких перевищує 1000 В. Такі двигуни використовуються у галузях промисловості, де необхідне забезпечення значної потужності електроприводів, зокрема в енергетиці, гірничодобувній та хімічній промисловості. Крім того, високовольтні електродвигуни широко застосовуються для приводу потужних насосних установок, компресорів і вентиляційних систем [6].

До основних переваг високовольтних електродвигунів належать:

- ~ можливість ефективної передачі значної потужності з меншими втратами електроенергії. Для передачі великих потужностей у низьковольтних системах необхідні підвищені струми та кабелі більшого перерізу, тоді як використання високої напруги дозволяє зменшити струмове навантаження та скоротити витрати на кабельну продукцію;
- ~ зменшення необхідного перерізу кабелів завдяки роботі при менших струмах, що забезпечує економічну доцільність передачі електроенергії на значні відстані;
- ~ можливість отримання високих значень потужності при відносно компактних габаритах електродвигуна. У порівнянні з низьковольтними аналогами однакової потужності високовольтні двигуни займають менше виробничого простору.

До недоліків високовольтних електродвигунів можна віднести:

- ~ високу вартість виготовлення та монтажу, що обумовлено необхідністю використання спеціальних ізоляційних матеріалів і більш складною технологією виробництва;
- ~ підвищені вимоги до технічного обслуговування та ремонту. Експлуатація таких двигунів потребує наявності спеціалізованого



обладнання та персоналу відповідної кваліфікації через необхідність дотримання суворих вимог електробезпеки;

необхідність застосування додаткового електротехнічного обладнання, зокрема силових трансформаторів, високовольтних розподільчих пристроїв та інших засобів, що забезпечують нормальні умови роботи електродвигуна.

Високовольтні електродвигуни переважно використовуються у сферах промисловості, де необхідне забезпечення значної потужності електроприводів. Зокрема, їх застосовують в енергетичній галузі для приводу насосних агрегатів, у металургійній промисловості, а також на великих виробничих підприємствах. Крім того, такі двигуни доцільно використовувати у системах із протяжними кабельними лініями, де важливим фактором є зменшення втрат електроенергії під час її передачі.

Установки, що потребують високої потужності та підвищеної енергоефективності, найчастіше комплектуються саме високовольтними електродвигунами, оскільки вони забезпечують надійну та стабільну роботу промислового обладнання при оптимізації витрат на електротехнічну інфраструктуру.

Низьковольтні електродвигуни призначені для роботи в електричних мережах напругою до 1000 В. Такі двигуни переважно використовуються в електроприводах невеликої та середньої потужності. Основними сферами їх застосування є побутове обладнання, вентиляційні системи, насосні установки, а також різноманітні промислові та комерційні об'єкти із помірними вимогами до споживаної потужності [8].


До основних переваг низьковольтних електродвигунів належать:
~ відносно невисока вартість виготовлення, що пояснюється простішою конструкцією, використанням стандартних матеріалів та доступнішими технологіями виробництва;

~ простота монтажу та технічного обслуговування. Завдяки менш жорстким вимогам до ізоляції та допоміжного обладнання експлуатація таких двигунів є менш складною та економічно вигіднішою;

~ універсальність застосування у системах малої та середньої потужності. Низьковольтні електродвигуни широко використовуються у вентиляційних установках, системах кондиціонування, насосному обладнанні, компресорах та інших механізмах із помірними навантаженнями;

~ можливість ефективної роботи у системах із регульованою швидкістю обертання. Використання частотних перетворювачів дозволяє легко інтегрувати низьковольтні двигуни в сучасні автоматизовані системи керування, що підвищує гнучкість та енергоефективність електропривода при змінних режимах навантаження.

До недоліків низьковольтних електродвигунів належать:
~ менша ефективність при передачі великих потужностей. Для забезпечення необхідної потужності в таких системах потрібне використання кабелів більшого перерізу, що призводить до збільшення



вартості електротехнічної інфраструктури, особливо на значних відстанях;

необхідність застосування товстіших струмопровідних кабелів зі зростанням потужності електропривода, що ускладнює монтажні роботи та підвищує витрати на матеріали;

виникнення додаткових втрат електроенергії в системах із великими струмовими навантаженнями, що може негативно впливати на загальну ефективність роботи електропривода.

Низьковольтні електродвигуни переважно застосовуються в установках малої та середньої потужності, зокрема у вентиляційних системах, насосних станціях, побутовому обладнанні, а також у електроприводах, що працюють спільно з частотними перетворювачами. Такі двигуни є доцільним рішенням для невеликих виробничих підприємств і комерційних об'єктів, де відсутня потреба у передачі надвеликих потужностей, проте важливими факторами залишаються економічність, надійність та гнучкість роботи електропривода.

1.4 Аналіз недоліків роботи системи та обґрунтування необхідності її модернізації


Часті відмови обладнання та потреба у регулярному технічному обслуговуванні призводять до збільшення експлуатаційних витрат підприємства. Несправності насосного обладнання можуть спричинити вимушені простої технологічного процесу, що негативно впливає на виробничу діяльність та призводить до додаткових витрат, пов'язаних із виконанням ремонтних робіт.

Значні пускові струми електродвигунів зумовлюють підвищене споживання електричної енергії, що є особливо актуальним в умовах необхідності економії енергоресурсів. Сучасна енергетична ситуація в Україні, яка значною мірою ускладнена наслідками воєнних дій, вимагає впровадження енергоефективних рішень та зниження навантаження на електричні мережі.

Крім того, великі пускові струми створюють додаткове навантаження на систему електропостачання, що може спричинити просідання напруги та погіршення якості електроенергії. Такі явища негативно впливають на роботу іншого електрообладнання та підвищують імовірність виникнення аварійних режимів.

З урахуванням виявлених недоліків модернізація системи запуску електродвигунів насосної станції є необхідною умовою підвищення надійності та ефективності роботи обладнання, а також зменшення експлуатаційних витрат. Одним із найбільш ефективних способів вирішення зазначених проблем є застосування частотних перетворювачів, які забезпечують плавне регулювання швидкості обертання електродвигунів та оптимізацію режимів їх роботи.

Використання частотних перетворювачів дозволяє суттєво обмежити величину пускових струмів електродвигунів, що зменшує



навантаження на електричну мережу та технологічне обладнання. Це сприяє скороченню втрат електричної енергії та покращенню показників якості електропостачання.

Можливість регулювання швидкості обертання електродвигунів дає змогу адаптувати режими роботи насосного обладнання відповідно до поточних виробничих потреб. У результаті зменшується загальне споживання електроенергії та знижуються витрати підприємства на енергоресурси.

Плавний запуск електродвигунів і зменшення механічних навантажень під час роботи позитивно впливають на довговічність насосних агрегатів та електроприводів. Це дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування, ремонт та заміну обладнання.

Зменшення негативного впливу перехідних процесів і стабілізація режимів роботи системи забезпечують підвищення надійності функціонування насосної станції. Завдяки цьому знижується ймовірність виникнення аварійних ситуацій та забезпечується безперервність виробничого процесу.

Скорочення експлуатаційних витрат, підвищення енергоефективності та покращення надійності роботи обладнання в цілому сприяють підвищенню економічної ефективності підприємства.

Таким чином, модернізація системи запуску електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху шляхом впровадження частотних перетворювачів є технічно та економічно обґрунтованим рішенням. Реалізація даного заходу дозволить підвищити ефективність роботи обладнання, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільну роботу підприємства в умовах обмежених енергетичних ресурсів.

Також під час експлуатації електродвигунів було виявлено підвищений рівень вібрації і те, що двигуни серії А не призначені для насосів, що негативно впливає на надійність та безпечність роботи обладнання (рис. 1.13). З метою усунення даної проблеми було проведено заміну підшипників та виконано центрування двигуна, проте зазначені заходи не дали позитивного результату, а рівень вібрації залишився незадовільним. У ході подальшого обстеження встановлено, що двигун є неремонтопридатним, у зв'язку з чим прийнято рішення про його заміну. Як заміну планується використати електродвигуни напругою 380 В, які наявні на підприємстві, що дозволить скоротити час простою обладнання та зменшити витрати на придбання нового устаткування.



Рисунок 1.13 – Вібрація двигуна

1.5 Різновиди частотних перетворювачів

Частотні перетворювачі поділяються за кількома основними ознаками, серед яких принцип роботи, тип системи керування, метод охолодження, ступінь захисту, конструктивні особливості та область використання [9]. Основні класифікаційні характеристики частотних перетворювачів наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - характеристики частотних перетворювачів

| Ознака класифікації | Типи частотних перетворювачів | Опис |
|---------------------|-------------------------------|---|
| Принцип дії | Векторні | Точне керування моментом і швидкістю, використовують векторне керування (FOC) |
| | Скалярні | Регулювання частоти і напруги без точного керування моментом (V/f Control) |

Продовження таблиці 1.2


| Ознака класифікації | Типи частотних перетворювачів | Опис |
|-------------------------|-------------------------------------|--|
| Тип керування | Розімкнута система | Без зворотного зв'язку, прості в конструкції і дешевші |
| | Замкнута система | Використовують зворотний зв'язок, точне керування швидкістю і моментом |
| Спосіб охолодження | Повітряне охолодження | Використовують вентилятори або природну конвекцію |
| | Рідинне охолодження | Використовують рідину для відведення тепла |
| Ступінь захисту | Низький ступінь захисту (IP20-IP44) | Захист від пилу і обмеженого впливу води, для внутрішнього використання |
| | Високий ступінь захисту (IP54-IP66) | Захист від пилу і струменів води, для важких умов експлуатації |
| Конструктивне виконання | Моноблочне виконання | Всі компоненти інтегровані в одному корпусі, прості в установці |
| | Модульне виконання | Складаються з окремих модулів, гнучкі і масштабовані |
| Сфера застосування | Промислові | Для промислових установок, висока надійність і стійкість до промислових умов |
| | Комерційні побутові | Для комерційних і побутових установок, менші за розміром і менш потужні |

Векторні частотні перетворювачі (векторне керування або Field-Oriented Control, FOC) належать до найбільш ефективних способів керування асинхронними електродвигунами. Даний метод забезпечує точне та стабільне регулювання швидкості обертання і крутного моменту двигуна завдяки розподілу змінних величин на окремі складові.

Основний принцип векторного керування полягає у розділенні двох складових струму асинхронного двигуна: струму, який створює крутний момент, та струму, що формує магнітне поле і впливає на утворення магнітного потоку [10].

Для досягнення максимальної ефективності роботи електродвигуна керування цими складовими здійснюється окремо.

Векторне керування базується на орієнтації вектора магнітного потоку відповідно до напрямку обертання ротора, тобто на орієнтації поля



магнітного потоку за результатами вимірювання швидкості ротора. Такий метод дає можливість отримувати максимальний крутний момент незалежно від швидкості обертання двигуна.

Переваги векторних частотних перетворювачів:

- забезпечення високої точності регулювання швидкості та крутного моменту;
 - можливість отримання максимального крутного моменту при низьких обертах;
 - зниження енергоспоживання завдяки більш точному керуванню електродвигуном;
 - ефективна робота електроприводу навіть на малих швидкостях обертання, що є важливим для складних технологічних процесів.
- Недоліки векторних частотних перетворювачів:
- системи векторного керування мають складніше налаштування та потребують точного визначення параметрів електродвигуна;
 - вартість таких перетворювачів є вищою через складнішу конструкцію та необхідність використання додаткових елементів, зокрема енкодерів;
 - для забезпечення максимальної ефективності роботи необхідне точне налаштування параметрів асинхронного двигуна, таких як опір та індуктивність.


Векторне керування широко застосовується на насосних станціях, де потрібне точне регулювання потоку рідини. Використання векторних частотних перетворювачів забезпечує ефективну роботу насосів при змінних навантаженнях, підтримує оптимальну продуктивність обладнання та сприяє зниженню енергоспоживання.

Серед сучасних засобів регулювання кутової швидкості асинхронних електричних машин широкого поширення набули частотні перетворювачі зі скалярним принципом керування.

В основі зазначеного підходу покладено принцип пропорційної зміни амплітуди живильної напруги залежно від частоти, що подається на статорні обмотки двигуна. Ключовою перевагою та характерною ознакою скалярного методу є відсутність потреби в побудові складних контурів зворотного зв'язку для безперервного контролю динамічних параметрів - частоти обертання ротора або електромагнітного моменту [11].

У пристроях такого типу вихідна частота напруги коригується безпосередньо відповідно до заданого технологічного режиму та необхідної швидкості електропривода. При цьому, з метою збереження стабільної перевантажувальної здатності й забезпечення належних експлуатаційних характеристик двигуна у всьому діапазоні регулювання, система автоматично підтримує сталість визначеного співвідношення між величиною напруги та її частотою.

Базовий алгоритм функціонування даного методу передбачає синхронне коригування амплітуди напруги при зміні її частоти. Таке регулювання є необхідним для стабілізації величини основного магнітного



поток в повітряному проміжку електричної машини. Підтримання магнітного потоку на постійному рівні гарантує стійку й надійну роботу електропривода у визначеному діапазоні частот, запобігаючи виникненню аварійних режимів, зокрема надмірному струмовому перевантаженню та тепловому пошкодженню ізоляції статорних обмоток.

Математичний вираз, що описує закон скалярного керування, має такий вигляд:

$$\frac{U}{f} = const, \quad (1.1)$$

де: U - напруга,
 f - частота.

Таким чином, між вихідною частотою та амплітудою напруги зберігається прямо пропорційна залежність: інтенсифікація частотного режиму супроводжується відповідним зростанням рівня напруги, тоді як зниження частоти викликає пропорційне зменшення її величини.

До головних переваг частотно-регульованих електроприводів зі скалярним керуванням належать такі чинники:

- конструктивна та експлуатаційна простота – пристрої відрізняються нескладною апаратною архітектурою, а також легкістю проведення пусконаладжувальних робіт;


- економічна доцільність та доступність – відсутність потреби в інтеграції прецизійних датчиків (швидкості, положення або моменту) і розгортанні контурів зворотного зв'язку дозволяє суттєво знизити капітальні витрати на обладнання порівняно з аналогами векторного типу;

- універсальність та надійність базових алгоритмів – мінімальні вимоги до обчислювальної потужності мікропроцесорних систем керування роблять ці перетворювачі оптимальним та ефективним рішенням для масового впровадження у типових загальнопромислових механізмах.

Поряд із перевагами, системам скалярного регулювання притаманні певні технічні обмеження та недоліки, серед яких:

- обмежена точність регулювання динамічних параметрів – порівняно з системами векторного керування, скалярний метод не спроможний забезпечити прецизійне підтримання та високоточне відпрацювання заданих значень крутного моменту або кутової швидкості електричного привода;

- зниження енергетичної та технологічної ефективності в перехідних режимах – під час суттєвих коливань статичного навантаження на валу (зокрема, в моменти важкого пуску або різкого накиду навантаження) даний тип перетворювачів демонструє погіршення динамічних показників через нездатність оперативно компенсувати зміну моменту;



- відсутність безпосереднього контролю внутрішніх координат двигуна – замкнене й операційне керування електромагнітним моментом є неможливим внаслідок базової архітектури методу, яка не передбачає наявності інформаційних каналів прямого зворотного зв'язку за поточкоючепленням чи струмом ротора.

Практична реалізація частотно-регульованих асинхронних електроприводів зі скалярним керуванням є найбільш доцільною та ефективною у технологічних комплексах, де критерії прецизійної точності підтримання швидкості не є домінуючими, а першочергова увага приділяється експлуатаційній надійності, простоті обслуговування та економічності.

До основних сфер та об'єктів впровадження таких пристроїв належать:

- насосні комплекси та станції водопостачання – регулювання продуктивності відцентрових насосів для підтримання заданого тиску в магістралях;


- вентиляційні та аспіраційні системи – керування обертами вентиляторів промислового та побутового призначення з метою оптимізації повітряних потоків та енергозбереження;

- транспортувальні та конвеєрні лінії – забезпечення плавного пуску та регулювання швидкості стрічкових чи роликкових транспортерів невідповідального призначення;

- побутова техніка та комерційне обладнання – інтеграція в блоки керування кліматичних систем, пральних машин та інших пристроїв масового вжитку.

Частотно-регульовані електроприводи з розімкненим контуром керування (Open-loop frequency converters) становлять клас перетворювачів, у яких формування керуючих впливів на електродвигун реалізується без використання інформаційних каналів зворотного зв'язку. У подібних структурах безпосереднє інструментальне вимірювання та контроль поточних динамічних і теплових параметрів машини – таких як кутова швидкість ротора, електромагнітний момент або температура обмоток – не передбачені. Процес регулювання в таких системах базується виключно на формуванні заданих значень амплітуди й частоти вихідної напруги, що надходить на статор, без операційного зіставлення з фактичними показниками робочого режиму двигуна в реальному часі [11].

Алгоритм зміни частоти обертання виконавчого асинхронного двигуна в розімкнених перетворювачах здійснюється на основі розрахункових параметрів напруги та частоти, які визначаються оператором вручну або надходять як керуючий сигнал від зовнішнього контролера (наприклад, ПЛК). Базовий принцип функціонування полягає в генерації автономною інверторною напругою перетворювача фіксованої частотної характеристики та її подальшій комутації на обмотки



електричної машини, що забезпечує зміну режимів її роботи відповідно до заданої технологічної тахограми.

Суттєвою конструктивною особливістю зазначених пристроїв є відсутність безперервного моніторингу фактичної кутової швидкості або електромагнітного моменту машини в режимі реального часу. Внаслідок цього показники точності та динамічні властивості регулювання в розімкнених системах поступаються аналогічним характеристикам замкнених систем електропривода, які функціонують на основі сигналів зворотного зв'язку.

До головних переваг частотних перетворювачів із розімкненим контуром керування належать:

- спрощена схемотехнічна архітектура – відсутність потреби у додаткових вимірювальних пристроях та спеціалізованих модулях сполучення для зняття робочих параметрів електродвигуна суттєво спрощує загальну схему електропривода;

- економічна ефективність – мінімізація кількості апаратних засобів та відмова від високовартісних прецизійних датчиків зворотного зв'язку дозволяють значно знизити собівартість як самого перетворювача, так і всієї системи загалом;

- мінімізація пусконаладжувальних робіт – відсутність етапу калібрування та конфігурування контурів регулювання швидкості чи моменту суттєво полегшує процес введення обладнання в експлуатацію;


- висока експлуатаційна надійність та невибагливість у технічному обслуговуванні – спрощена конструкція та менша кількість конструктивних елементів (зокрема зовнішніх ліній зв'язку з датчиками) зменшують ймовірність відмов і знижують витрати на періодичне сервісне обслуговування.

До основних технічних недоліків та експлуатаційних обмежень частотних перетворювачів із розімкненим контуром керування слід віднести:

- низьку прецизійність та обмежений динамічний діапазон – відсутність інформаційних каналів зворотного зв'язку унеможлиблює здійснення високоточного контролю та оперативного відпрацювання поточних змін кутової швидкості й електромагнітного моменту на валу електричної машини;

- статичну похибку регулювання при змінних навантаженнях – будь-які коливання моменту опору робочого механізму безпосередньо впливають на ковзання асинхронного двигуна, що призводить до суттєвого відхилення фактичної швидкості від заданого значення;

- неможливість інтеграції у високодинамічні електроприводи – через відсутність контурів самоналагодження та врахування миттєвих значень координат руху, розімкнені системи є непридатними для технологічних комплексів, що вимагають високої швидкодії, точного позиціонування або роботи на наднизьких обертах;



- підвищений ризик аварійних режимів за тепловим станом – відсутність інтегрованого теплового моніторингу або непрямого обчислення температурних індексів обмоток суттєво підвищує ймовірність теплового перевантаження та критичного перегріву електродвигуна під час роботи у важких режимах (наприклад, тривала робота з високим моментом на знижених частотах, коли погіршується самовентиляція).

Практичне застосування частотних перетворювачів із розімкненою структурою керування є технічно та економічно виправданим у невибагливих системах електропривода, до яких не висуваються жорсткі вимоги щодо швидкодії, точності позиціонування та динамічних показників регулювання. Таке обладнання є оптимальним для технологічних процесів із відносно стабільним характером статичного навантаження на валу або для механізмів із вентиляторним моментом опору.

Типовими об'єктами впровадження розімкнених систем є:


- транспортувальні та конвеєрні лінії – стрічкові, роликові та ланцюгові транспортери загальнопромислового призначення, що працюють у тривалому режимі без частих пусків і реверсів;

- об'єкти житлово-комунального господарства (ЖКГ) та енергетики – тягодуттєві механізми, промислові вентиляційні системи, аспіраційні установки та локальні насосні станції малої потужності;

- технологічне обладнання підприємств малої та середньої промисловості – допоміжні приводи верстатів, змішувачі, дозатори та інші агрегати, де відхилення швидкості під навантаженням не порушує загальний алгоритм виробництва.

Частотно-регульовані електроприводи із замкненою структурою керування (Closed-loop frequency converters) представляють клас вискоефективних перетворювачів, в яких для координації роботи електродвигуна інтегровано канали зворотного зв'язку з відповідними первинними вимірювальними перетворювачами (датчиками). Зазначені датчики здійснюють безперервну реєстрацію поточних координат стану машини, зокрема кутової швидкості, електромагнітного моменту та теплового стану обмоток. Наявність замкненого контуру дозволяє реалізувати прецизійне та високодинамічне керування електроприводом за рахунок перманентної адаптації та корекції керуючих впливів у режимі реального часу, зважаючи на коливання статичного навантаження на валу та збурюючі фактори зовнішнього середовища.

Для побудови інформаційного забезпечення замкнених систем застосовують спеціалізовані датчики зворотного зв'язку: аналогові тахогенератори (або цифрові тахометри) для детектування частоти обертання ротора, а також оптичні чи магнітні енкодери для високоточного визначення кутового положення валу електричної машини. Отримана від цих пристроїв телеметрична інформація про фактичний динамічний стан об'єкта регулювання безперервно надходить до порівняльного елемента мікропроцесорної системи керування, де формується сигнал



неузгодженості, на основі якого коригуються амплітуда, частота та фаза вихідної напруги інвертора.

Головною функціональною задачею частотного перетворювача із замкненим контуром є інваріантність (незалежність) заданих технологічних параметрів роботи двигуна (швидкості, позиції чи крутного моменту) відносно динамічно змінних моментів опору робочого механізму чи інших дестабілізуючих чинників. У процесі функціонування макроструктура керування перетворювача динамічно масштабує параметри широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), спираючись на миттєві дані, що надходять від контурів зворотного зв'язку.

Впровадження частотно-регульованих електроприводів із замкненою структурою забезпечує низку суттєвих технологічних та експлуатаційних переваг:

- високу прецизійність та жорсткість механічних характеристик: завдяки безперервному функціонуванню контурів зворотного зв'язку, система гарантує високоточне підтримання заданої кутової швидкості або електромагнітного моменту, нівелюючи вплив динамічних коливань навантаження на валу;

- відмінні показники швидкодії та динамічної стійкості: можливість точного потипового контролю координат руху дозволяє успішно інтегрувати такі перетворювачі у високодинамічні технологічні комплекси, зокрема в роботизовані системи, просторові маніпулятори та верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК);


- оптимізацію енергоспоживання та підвищення ККД: мінімізація статичних і динамічних похибок регулювання дозволяє системі працювати в енергоефективних режимах, що суттєво знижує питомі витрати електроенергії, особливо під час функціонування механізмів у важких та знакозмінних експлуатаційних умовах;

- адаптивність системи в реальному часі: безперервний моніторинг внутрішніх параметрів електричної машини забезпечує миттєву компенсацію випадкових збурюючих впливів, гарантуючи стійкість і безаварійність технологічного процесу при будь-яких режимах навантаження.

Попри високі технічні характеристики, частотно-регульованим електроприводам із замкненим контуром керування притаманні певні експлуатаційні та економічні недоліки:

- 1) суттєві капітальні витрати – інтеграція первинних вимірювальних перетворювачів, розгортання додаткових кабельних трас для передачі інформаційних сигналів, а також використання високоефективних мікропроцесорних модулів із підвищеною обчислювальною потужністю суттєво підвищують загальну вартість обладнання;

- 2) складність пусконаладжувальних робіт – процес введення системи в експлуатацію вимагає висококваліфікованого підходу, оскільки потребує точного юстування, калібрування датчикової апаратури та



параметричного налаштування складних регуляторів (наприклад, ПІД-регуляторів) контурів швидкості й моменту;

3) зниження загальної надійності за рахунок додаткових конструктивних елементів – наявність енкодерів чи тахогенераторів створює додаткові потенційні вузли відмови; такі пристрої є чутливими до вібрацій, запиленості та електромагнітних завад, що зумовлює потребу в регулярному сервісному обслуговуванні й періодичній повірці;

4) залежність енергетичної ефективності від якості налаштування – замкнені системи є критично чутливими до коректності зворотного зв'язку. Неправильне параметрування алгоритмів керування, люфти в механічних з'єднаннях датчиків або деградація їхніх характеристик призводять до виникнення автоколивальних процесів, перерегулювання і, як наслідок, до перевитрати електричної енергії та додаткового динамічного навантаження на елементи привода.

Частотно-регульовані електроприводи із замкненим контуром керування є базовим елементом автоматизації у технологічних комплексах, де критично важливим є забезпечення прецизійного контролю кінематичних і динамічних параметрів виконавчих двигунів під час дії знакозмінних навантажень.

Основними індустріальними сферами впровадження таких високоточних систем є:

1) робототехніка та інтелектуальні маніпулятори – забезпечення просторової точності позиціонування, плавного гальмування та високої швидкодії ланок роботизованих комплексів;


2) складні транспортні та підйомно-механічні системи – пасажирські та вантажні ліфти, шахтні підйомні установки, крани важкого режиму роботи, де необхідне точне регулювання моменту при нульовій швидкості та утримання вантажу;

3) комплексна автоматизація промислового виробництва – багатодвигунові конвеєрні лінії з синхронізацією швидкостей, високоточні верстати, прокатні стани та пакувальні автомати;

4) сучасні енергетичні установки та генераційні комплекси – системи позиціонування лопатей вітрогенераторів, автоматизовані приводи запірно-регулювальної арматури високого тиску на теплових та атомних станціях [12].

Перетворювачі з повітряним охолодженням (Air-cooled frequency converters) – це тип частотних перетворювачів, у яких для зниження температури та підтримки оптимальних умов роботи використовується повітря як охолоджувальний агент. Вони є одним з найбільш поширених типів охолодження для частотних перетворювачів, оскільки є економічними та простими у використанні, особливо в умовах невеликої або середньої потужності.

У перетворювачах з повітряним охолодженням тепловиділення, що виникає під час роботи перетворювача, усувається за допомогою циркуляції повітря через внутрішні компоненти. Для цього



використовуються вентилятори, які створюють потік повітря, що відводить тепло від поверхні ключових елементів, таких як силові транзистори, діоди, фільтри та інші компоненти перетворювача. Тепле повітря викидається назовні, а свіже повітря надходить для охолодження внутрішніх частин [13].

Конструктивне виконання частотних перетворювачів із повітряною системою терморегуляції має низку суттєвих переваг, які зумовлюють їх масове впровадження:

1) конструктивну простоту – архітектура системи не потребує інтеграції складних гідравлічних вузлів, герметичних контурів або додаткових допоміжних агрегатів;

2) економічну доступність – капітальні витрати на проектування та виготовлення повітряних каналів і радіаторних модулів є значно нижчими порівняно з рідинними аналогами, що мінімізує кінцеву вартість обладнання для споживача;

3) оптимальну термодинамічну ефективність у базових діапазонах – для силової електроніки низької та середньої потужності конвекційне відведення тепла повністю задовольняє вимоги безпечної експлуатації без ризику виходу напівпровідників за межі критичних температур;


4) низькі експлуатаційні вимоги – системи примусової вентиляції не потребують специфічного сервісного обслуговування (наприклад, контролю хімічного складу холодоагенту чи перевірки герметичності стиків); регламентні роботи обмежуються періодичним очищенням радіаторів та повітряних фільтрів від пилових наслоєнь і твердих дисперсних частинок.

Поряд із очевидними перевагами, застосування систем повітряного терморегулювання супроводжується низкою технічних та експлуатаційних обмежень:

1) підвищеним рівнем акустичного навантаження – функціонування високооборотних вентиляторів примусового охолодження генерує стабільний аеродинамічний шум, що обмежує можливість монтажу обладнання безпосередньо поблизу житлових, адміністративних чи офісних приміщень без використання додаткових звукоізоляційних засобів;

2) обмеженою теплоємністю охолоджувального середовища – фізико-хімічні властивості повітря обмежують його застосування в силовій апаратурі високих класів потужності, де щільність теплових потоків вимагає впровадження більш ефективних контурів десипації, зокрема систем рідинного охолодження;

3) інтенсивним пилозабрудненням внутрішнього простору – спрямований повітряний потік неминуче транспортує з навколишнього простору дрібнодисперсні частки пилу та вологи. Наслоєння цих часток на радіаторах і друкованих платах знижує коефіцієнт теплопередачі, погіршує діелектричну стійкість ізоляції та збільшує періодичність проведення регламентного сервісного обслуговування;



4) жорсткою залежністю від кліматичних параметрів середовища – ефективність роботи системи прямо пропорційно залежить від градієнта температур між напівпровідниковими кристалами та атмосферою. Експлуатація перетворювача в умовах критично високих температур або підвищеної вологості суттєво знижує інтенсивність теплообміну, що може призвести до теплового пробую силових ключів або вимагати примусового зниження номінальної потужності пристрою (дерейтингу).

Практична реалізація та інтеграція частотних перетворювачів із повітряною системою охолодження є доцільною у технологічних сферах, де пріоритет надається високій економічній ефективності, капітальній доступності пристроїв та базовим вимогам до динаміки теплових процесів.

Основними експлуатаційними напрямками та умовами впровадження таких пристроїв є:

1) кліматично регульовані виробничі зони – монтаж обладнання здійснюється в електротехнічних приміщеннях або шафах керування (наприклад, з організованою припливно-витяжною вентиляцією), де параметри мікроклімату утримуються в межах норми, що виключає потребу в розгортанні високовартісних рідинних контурів;


2) керування допоміжними загальнопромисловими механізмами – забезпечення енергоефективного регулювання швидкості приводів малої та середньої потужності, зокрема відцентрових насосів, промислових компресорних установок та димососів;

3) автоматизація систем вентиляції та кондиціонування – інтеграція в контури керування осьовими та радіальними вентиляторами для стабілізації повітряних потоків;

4) електроприводи з помірним тривалим навантаженням – стабілізація режимів роботи асинхронних двигунів, що функціонують без затяжних пусків, частих реверсів або значних теплових перевантажень, які могли б викликати перегрів напівпровідникових кристалів.

Частотно-регульовані електроприводи з рідинним охолодженням (Liquid-cooled frequency converters) належать до класу вискоефективних пристроїв силової електронної техніки, в яких як робоче терморегулююче середовище для евакуації надлишкової теплової енергії застосовується рідкий холодоагент (дистильована вода, етиленгліколеві або пропіленгліколеві суміші, спеціалізовані антифризи). Завдяки високій питомій теплоємності рідкої фази, такі системи забезпечують інтенсивне відведення тепла, що робить їх оптимальним та технічно обґрунтованим рішенням для експлуатації в електроприводах великої потужності, які працюють у важких та тривалих режимах навантаження.

Механізм термостабілізації у пристроях із рідинним контуром базується на безперервному примусовому кругообігу теплоносія через спеціалізовані колектори, інтегровані канали або охолоджувальні плити (chillers). Ключові джерела тепловиділення - силові напівпровідникові модулі (IGBT-транзистори), діодні блоки випрямляча та елементи емнісно-індуктивних фільтрів – змонтовані безпосередньо на металевих



теплообмінниках. Холодоагент, омиваючи ці зони, акумулює теплову енергію та транспортує її за межі корпусу перетворювача по системі закритих трубопроводів до зовнішнього контуру охолодження (радіатора із зовнішнім обдувом або градирні), де рідина віддає тепло, знижує свою температуру і знову подається в робочу зону за допомогою циркуляційного насоса.

Конструктивне виконання частотних перетворювачів із рідинними системами терморегуляції забезпечує комплекс суттєвих технологічних та експлуатаційних переваг:

1) високу інтенсивність теплообміну та теплопередачі – оскільки коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність рідинних холодоагентів у разі перевищують аналогічні фізичні показники атмосферного повітря, дана система гарантує ефективну дисипацію значних теплових потоків навіть у надпотужних силових режимах;

2) високу щільність компоновання та масогабаритна оптимізація – завдяки підвищеній ефективності зняття тепла з одиниці площі напівпровідникового кристала, стає можливим суттєве зменшення габаритних розмірів силового блоку перетворювача. Це дозволяє створювати компактні високонатужні пристрої, реалізація яких із повітряними радіаторами була б неможливою через надмірні геометричні розміри останніх;


3) покращені акустичні характеристики (низький рівень шуму) – повна відмова від потужних високооберткових вентиляторів або мінімізація їх використання дозволяє радикально знизити рівень аеродинамічного та механічного шуму під час роботи обладнання, що є критично важливим критерієм для специфічних виробничих зон, закритих лабораторій чи цивільних об'єктів;

4) підвищену термодинамічну стійкість та надійність – безперервний та контрольований рух теплоносія забезпечує ізотермічний режим роботи силових ключів, мінімізуючи амплітуду температурних коливань. Це суттєво знижує ризик термічної деградації напівпровідникових структур, запобігає аварійним збоям та підвищує загальний експлуатаційний ресурс (MTBF) пристрою при критичних навантаженнях.

Незважаючи на високу теплотехнічну ефективність, інтеграція рідинних систем терморегуляції супроводжується специфічними конструктивними та експлуатаційними недоліками:

1) високою складністю та капіталомісткістю архітектури – розгортання рідинного контуру вимагає застосування додаткового гідравлічного та допоміжного обладнання (циркуляційних насосних агрегатів, рідинно-повітряних теплообмінників, розширювальних баків, запірно-регулювальної арматури та системи трубопроводів), що суттєво підвищує загальну кошторисну вартість електропривода;

2) підвищеними вимогами до регламентного сервісного обслуговування – експлуатація таких комплексів передбачає регулярне



проведення специфічних технічних процедур – моніторингу статичного й динамічного тиску в контурі, контролю рівня та фізико-хімічних показників холодоагенту, перевірки герметичності з'єднань, а також періодичного промивання внутрішніх каналів;

3) ризиком корозійної деградації та шламоутворення – хімічний склад теплоносія з часом може змінюватися, викликаючи процеси кавітації та електрохімічної корозії металевих поверхонь охолоджувальних плит і штуцерів. Це призводить до утворення відкладень, зниження пропускної здатності каналів і вимагає повної циклічної заміни робочої рідини;

4) імовірністю виникнення аварійних витоків – будь-яка розгерметизація гідравлічного тракту внаслідок механічного пошкодження, деструкції ущільнювальних манжет або порушення правил монтажу несе критичну загрозу. Потрапляння струмопровідного рідкого теплоносія на силові плати або мікропроцесорні модулі керування неминуче викликає коротке замикання та повний вихід частотного перетворювача з ладу.

Практична реалізація частотних перетворювачів із рідинною системою охолодження є доцільною та технічно необхідною у високонапружених промислових, енергетичних та інфраструктурних комплексах, де здійснюється керування електроприводами великої потужності та агрегатами з екстремальними режимами тепловиділення.

До основних сфер та об'єктів впровадження таких пристроїв належать:

а) важка промисловість та металургійні комплекси – автоматизація та регулювання режимів роботи потужних металообробних верстатів, прокатних станів, великогабаритних компресорних установок та магістральних насосних станцій;


б) об'єкти великої енергетики – інтеграція в системи керування високовольтними асинхронними й синхронними електродвигунами, а також допоміжними приводами турбогенераторів на теплових, атомних та гідроелектростанціях;

в) суднові електроенергетичні системи та морський транспорт – забезпечення стабільної роботи й охолодження потужних гребних електроприводів, головних судових генераторів та дизель-електричних ходових установок;

г) транспортна інфраструктура та електротранспорт – термостабілізація високонатужних тягових перетворювачів сучасних електромобілів, а також надшвидких зарядних станцій великої потужності;

д) ІТ-інфраструктура та центри обробки даних (ЦОД) – прецизійне відведення теплової енергії від спеціалізованих джерел безперебійного живлення (ДБЖ), статичних перетворювачів та супутнього енергетичного обладнання серверних комплексів і суперкомп'ютерів [14].

Частотні перетворювачі з низьким та помірним класами захисту оболонки (з індексами від IP20 до IP44) становлять групу пристроїв силової електроніки, конструктивне виконання яких передбачає



обмежений рівень герметизації від деструктивного впливу факторів навколишнього середовища, зокрема дрібнодисперсного пилу, вологи та випадкових механічних ушкоджень. Даний показник регламентується міжнародним та національним стандартами ступенів захисту, що забезпечуються оболонками (Ingress Protection), і є одним із ключових технічних критеріїв під час проектування та вибору електрообладнання для конкретних умов виробничого експлуатаційного середовища.

Вибір та експлуатація частотних перетворювачів із класами захисту оболонки IP20–IP44 обумовлені рядом суттєвих техніко-економічних переваг:

а) мінімальною собівартістю та капітальною доступністю – відсутність потреби в інтеграції високовартісних герметизуючих ущільнювачів, спеціалізованих кабельних ввідів та складних пило- й вологозахисних елементів корпусу дозволяє значно знизити витрати на виробництво, роблячи ці пристрої найбільш економічно вигідними;

б) високою адаптивністю до монтажу в закритих шафах керування – спрощена конструкція оболонки полегшує процес інтеграції пристроїв у стандартні розподільчі щити, модульні шафи або спеціалізовані електротехнічні приміщення з організованою припливно-витяжною вентиляцією та контрольованими параметрами мікроклімату;


в) масогабаритною оптимізацією та ергономічністю – пристрої даного виконання відрізняються компактними геометричними розмірами, що дозволяє раціонально використовувати внутрішній простір монтажних панелей, а також забезпечує легкий і швидкий доступ до силової та сигнальної клемних колодок під час проведення регламентних чи ремонтних робіт.

Поряд із техніко-економічними перевагами, експлуатація частотних перетворювачів із низьким класом захисту оболонки супроводжується жорсткими обмеженнями та недоліками:

а) вразливістю до деструктивних чинників довкілля – відсутність герметизації конструктивних елементів унеможлиблює інтеграцію пристроїв у середовищах із підвищеною вологістю, високою концентрацією пилу чи бруду, оскільки проникнення сторонніх тіл або крапель води всередину корпусу призведе до міжфазного короткого замикання;

б) критичними обмеженнями щодо умов локації та монтажу – експлуатація даного обладнання допускається виключно в межах детермінованих, сухих та чистих зон (лабораторії, закриті опалювальні склади, диспетчерські пункти), де повністю відсутні корозійно-активні, хімічно агресивні гази та волога. Пряме розгортання таких перетворювачів на відкритому повітрі або у важких промислових цехах є технічно неприпустимим;

в) низькою механічною та вібраційною стійкістю – полегшена архітектура оболонки, позбавлена додаткових демпфуючих екранів, ребер жорсткості чи посиленних кожухів, підвищує чутливість внутрішніх



друкованих плат і крихких мікропроцесорних компонентів до динамічних експлуатаційних навантажень: випадкових ударів, падінь інструменту або хронічного вібраційного впливу від суміжного технологічного обладнання.

Практичне впровадження частотних перетворювачів із низьким та помірним класами захисту оболонки є доцільним у цивільному будівництві, інфраструктурних об'єктах та на підприємствах, де умови експлуатації виключають вплив агресивних середовищ.

Основними типовими сферами застосування пристроїв у виконанні IP20–IP44 є:

а) інженерні мережі адміністративних та житлових будівель – керування виконавчими електроприводами систем кондиціонування повітря, циркуляційними насосами контурів опалення та гарячого водопостачання, а також припливно-витяжною вентиляцією офісних приміщень;

б) об'єкти з прецизійним контролем мікроклімату – інтеграція в системи автоматизації серверних кімнат, дата-центрів, чистих зон та науково-дослідних лабораторій, де вологість і температура безперервно підтримуються автоматикою в детермінованих межах;


в) допоміжні промислові й логістичні механізми – регулювання швидкості приводів стрічкових конвеєрів, пакувальних автоматів та сортувальних ліній, що функціонують у закритих знепилених приміщеннях з мінімальним рівнем твердих дисперсних забруднень.

Частотні перетворювачі з високим класом захисту оболонки (з індексами від IP54 до IP66) становлять категорію спеціалізованого обладнання силової електроніки, конструктивне виконання якого гарантує надійну ізоляцію внутрішніх вузлів від деструктивного впливу дрібнодисперсного пилу, вологи, водяних струменів та випадкових механічних ушкоджень. Практична реалізація пристроїв даного типу орієнтована на експлуатацію у важких промислових режимах, на відкритих технологічних майданчиках, а також у специфічних середовищах із критичним рівнем завад та агресивних чинників навколишнього простору [15].

Практична реалізація частотно-регульованих електроприводів у захищеному виконанні IP54–IP66 супроводжується комплексом суттєвих експлуатаційних та технологічних переваг:

а) стабільністю функціонування в екстремальних макрокліматичних умовах – конструктивні особливості оболонки гарантують безвідмовну роботу силової електроніки в середовищах із критичною концентрацією пилу, а також при впливі підвищених температур навколишнього повітря;

б) високою гідроізоляцією та всепогодністю – підвищений рівень захисту від проникнення рідких фракцій дозволяє здійснювати прямий монтаж перетворювачів поза межами приміщень (на відкритому повітрі), забезпечуючи безперебійну роботу під впливом злив зливого характеру, атмосферних опадів та високої відносної вологості;



в) підвищеною механічною стійкістю та антивібраційними властивостями – антивандальне виконання корпусу й посилена архітектура шасі ефективно нівелюють наслідки динамічних навантажень – випадкових механічних ударів, вібраційних збурень та струсів, надійно захищаючи тендітні внутрішні друковані плати від руйнування;

г) експлуатаційною надійністю та мінімізацією технологічних простоїв – тривалий життєвий цикл обладнання у важких режимах роботи є критично важливим для безперервних виробничих ліній та об'єктів енергетики, де раптові відмови автоматики тягнуть за собою суттєві фінансові збитки;

д) ефективною антикорозійною ізоляцією – завдяки високій герметичності внутрішнього об'єму повністю унеможлиблюється контакт струмоведучих шин та електронних компонентів із вологим або хімічно активним середовищем, що нівелює ризик окиснення, корозійної деградації та пробою ізоляції.

Попри високі показники надійності, застосування частотних перетворювачів із підвищеним класом захисту оболонки супроводжується певними техніко-економічними обмеженнями та недоліками:


а) високою кошторисною вартістю (капіталомісткість) – фінансові витрати на придбання такого обладнання є суттєво вищими, що зумовлено застосуванням високовартісних конструкційних матеріалів, спеціалізованих хімічно стійких покриттів, прецизійних еластомерних ущільнювачів та герметичних кабельних уводів;

б) збільшеними масогабаритними показниками – прагнення забезпечити високу герметичність та належне конвекційне відведення тепла всередині замкненого об'єму змушує виробників збільшувати геометричні розміри та масу корпусів. Це створює додаткові просторові обмеження при монтажі пристроїв на тримальних конструкціях або всередині комплексних щитових панелей;

в) специфічними експлуатаційними вимогами та ускладненим внутрішнім теплообміном – розгортання та обслуговування захищених перетворювачів в умовах відкритого повітря або агресивних промислових зон вимагає суворого дотримання регламенту (контроль цілісності ущільнювальних манжет при кожному відкритті кришки, захист від прямого сонячного випромінювання для запобігання тепловому пробою). Крім того, герметизація оболонки ускладнює природний теплообмін із навколишнім середовищем, що вимагає ретельного розрахунку теплового балансу пристрою.

Високозахищене конструктивне виконання частотних перетворювачів (класи IP54–IP66) є безальтернативним стандартом для розгортання надійних систем автоматизованого електропривода в екстремальних експлуатаційних середовищах.

Основними індустріальними секторами та об'єктами впровадження таких пристроїв є:



а) об'єкти відкритої локації та відновлювальної енергетики – забезпечення безперебійної роботи технологічних комплексів на будівельних майданчиках, що зазнають впливу всепогодних чинників, а також у гондолах вітроенергетичних установок (ВЕУ);


б) важка, видобувна та хімічна промисловість – автоматизація приводного обладнання на підприємствах нафтогазового сектору, цементних заводах, вугільних шахтах та металургійних комбінатах, де силова апаратура піддається хронічному впливу дрібнодисперсного абразивного пилу, шламу та агресивних хімічних сполук;

в) агропромисловий комплекс (АПК) та харчове виробництво – керування електроприводами механізмів на тваринницьких і переробних комплексах, а також на лініях харчової індустрії, де діють специфічні санітарно-гігієнічні вимоги (зокрема, періодичне миття обладнання водяними струменями під тиском);

г) водогосподарські комплекси та гідротехнічні споруди – інтеграція в системи магістрального водопостачання, аераційні установки очисних споруд, каналізаційні насосні станції (КНС), а також у приводи технологічного обладнання морських нафтовидобувних платформ;

д) генераційні об'єкти великої енергетики – забезпечення живучості та стабільного функціонування допоміжних приводів великої потужності (наприклад, живильних насосів, тягодуттєвих машин) безпосередньо в цехах теплових та гідроелектростанцій під впливом інтенсивних теплових та динамічних навантажень.

Сучасне індустриальне обладнання частотного регулювання, яке здебільшого випускається у високозахищених корпусах для безвідмовної експлуатації в несприятливих умовах середовища, інтегрується в масштабні виробничі комплекси з метою координації параметрів потужних електричних машин та супутніх виконавчих агрегатів, що висувають жорсткі вимоги до точності й ефективності стабілізації швидкості, крутного моменту та споживаної потужності. Зазначений клас пристроїв є базовим для технологічних систем із підвищеними критеріями щодо експлуатаційної надійності, стійкості до перевантажень та оперативного зв'язку зі складними багаторівневими структурами автоматизації. Номінальний інженерний діапазон таких промислових агрегатів охоплює широкий спектр від кількох кіловат до сотень мегават, забезпечуючи стабільне живлення силових електродвигунів у складах магістральних насосних станцій, компресорних установок, димососів, вентиляторів великої потужності та важких конвеєрних ліній. Паралельно з цим, у цивільному секторі та комунальній сфері широке розповсюдження знайшли частотні перетворювачі комерційного й побутового призначення, орієнтовані на оптимізацію енергоспоживання в інженерних мережах малих і середніх об'єктів, зокрема в торговельних залах, адміністративних будівлях, готельних комплексах, а також у приватних домогосподарствах. Ця категорія апаратури розрахована на взаємодію з двигунами значно меншої потужності порівняно з індустриальними аналогами, проте має



ідентичний функціональний потенціал у контексті енергозбереження, мінімізації динамічних вібрацій та зниження акустичного навантаження, знаходячи ефективне застосування в контурах кондиціонування й вентиляції повітря, технологічному обладнанні басейнів, локальних мережах водопостачання та автоматизованих системах опалення.

Частотні перетворювачі моноблочного виконання становлять окрему категорію пристроїв, що характеризується інтегрованою компактною архітектурою, за якої всі функціональні вузли, включаючи мікропроцесорну систему керування, силову частину та елементи терморегуляції, конструктивно розміщені в єдиному загальному корпусі. Зазначена компоновальна схема дозволяє суттєво спростити пусконаладжувальні роботи, мінімізувати просторові вимоги для розміщення апаратури, а також знизити загальні фінансові витрати в процесі складання й подальшого підключення до електричної мережі.

Загалом, сучасні частотно-регульовані приводи класифікуються за широким спектром технічних та конструктивних ознак, що забезпечує можливість гнучкого підбору оптимальної модифікації обладнання під конкретні експлуатаційні умови й технологічні вимоги. Глибоке розуміння цієї класифікаційної структури та фізичних принципів функціонування перетворювальної техніки є основоположним фактором для їх коректного вибору, сумісного впровадження та подальшої високоефективної експлуатації в різноманітних галузях промисловості.

У цьому контексті особливе місце посідають високовольтні частотні перетворювачі, які виступають критично важливими компонентами сучасних промислових систем, гарантуючи ефективне керування автоматизованими електроприводами високої напруги. Основні вектори практичного застосування таких високовольтних агрегатів зосереджені в багатьох капіталомістких сферах, включаючи металургію, нафтогазовий комплекс, хімічну індустрію, а також магістральні мережі централізованого водопостачання та водовідведення. Інтеграція подібних перетворювальних комплексів забезпечує можливість плавного регулювання швидкості та крутного моменту електродвигунів, що безпосередньо сприяє радикальному підвищенню загальної енергетичної ефективності виробничих процесів і суттєвому скороченню поточних експлуатаційних витрат [16].

Фундаментальна функція високовольтних частотних перетворювачів полягає у прецизійному регулюванні частоти та амплітуди напруги, що надходить на статорні обмотки електродвигуна. Реалізація цього процесу забезпечує можливість плавного керування частотою обертання ротора електричної машини без погіршення вихідних механічних характеристик привода. Сам фізичний принцип функціонування високовольтного перетворювача частоти базується на послідовній трансформації вхідної постійної або змінної напруги високого класу в вихідну змінну напругу з динамічно регульованим частотним спектром.

Серед типових схемотехнічних рішень побудови високовольтних перетворювальних пристроїв поширення набула так звана двотрансформаторна схема (інша назва – схема з низьковольтним ядром). У межах цієї структури вхідна висока напруга мережі живлення з номінальним значенням 6–10 кВ спочатку знижується до безпечного рівня 400–660 В за допомогою класичного вхідного знижувального трансформатора. На наступному етапі стандартний низьковольтний частотний перетворювач здійснює широтно-імпульсну модуляцію та формування необхідних параметрів сигналу. Після цього отримана модульована напруга низького класу знову піднімається до вихідного промислового рівня 6–10 кВ за допомогою спеціалізованого вихідного підвищувального трансформатора (рис. 1.14).

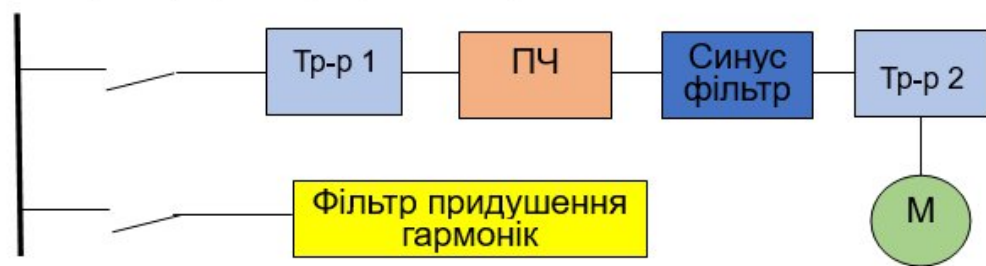


Рисунок 1.14 – Двотрансформаторна схемотехнічна структура побудови перетворювачів частоти

Попри відносно низьку капіталомісткість та доступну початкову вартість, двотрансформаторні схемотехнічні рішення для високовольтних частотних перетворювачів характеризуються рядом суттєвих експлуатаційних та технічних недоліків. По-перше, серйозну проблему становлять вихідні імпульсні перенапруги, пікові значення яких здатні досягати меж у 1 кВ, що створює критичну загрозу пробою ізоляції та виходу з ладу вихідного підвищувального трансформатора. Для нівелювання цього деструктивного чинника виникає інженерна необхідність в інтеграції високовартісних синусоїдальних фільтрів на виході інвертора. По-друге, дана топологія обмежує гнучкість технологічного процесу через звужений діапазон регулювання частоти обертання, який зазвичай становить від 0,5 до 1 від номінального значення. Спроба знизити швидкість нижче цієї межі призводить до насичення магнітопроводу вихідного трансформатора. Крім того, при зменшенні робочої частоти спостерігається стрімке падіння коефіцієнта корисної дії (ККД) самого електродвигуна, що тягне за собою значні невинні втрати активної енергії. Наостанок, наявність двох повнорозмірних силових трансформаторних агрегатів суттєво погіршує масогабаритні показники всього електропривода, ускладнюючи його логістику, монтаж та компонування в межах чинних машинних залів. Ця інженерна схема також відрізняється низьким коефіцієнтом потужності

внаслідок генерації значних потоків реактивної потужності, що змушує проєктанта передбачати додаткові витрати на встановлення супутніх пристроїв компенсації реактивної потужності (УКРП).

Схемотехнічні рішення тиристорних перетворювачів частоти високої напруги зазвичай передбачають обов'язкову інтеграцію спеціалізованого знижувального трансформатора багатообмоткового типу. Головна функція цього магнітного компонента полягає у масштабуванні трифазної мережевої напруги номіналом 6–10 кВ та її розщепленні на кілька ізольованих груп вторинних обмоток із меншим рівнем напруги, що переважно становить від 1 до 3 кВ.

На наступному етапі сформовані системи багатофазних напруг подаються на вхідні діодні випрямлячі для отримання постійного струму в ланках проміжного контуру. З метою радикального зниження рівня вищих гармонік, мінімізації коефіцієнта нелінійних спотворень та виключення негативного зворотного впливу силової апаратури на живильну мережу, у таких топологіях реалізуються багатопульсні схеми випрямлення – зокрема, 18- та 24-пульсні конфігурації. Застосування такого багатофазного зсуву дозволяє значно покращити якість і форму вихідної напруги, наближаючи її до чистої синусоїди без встановлення громіздких додаткових фільтрів (рис. 1.15).

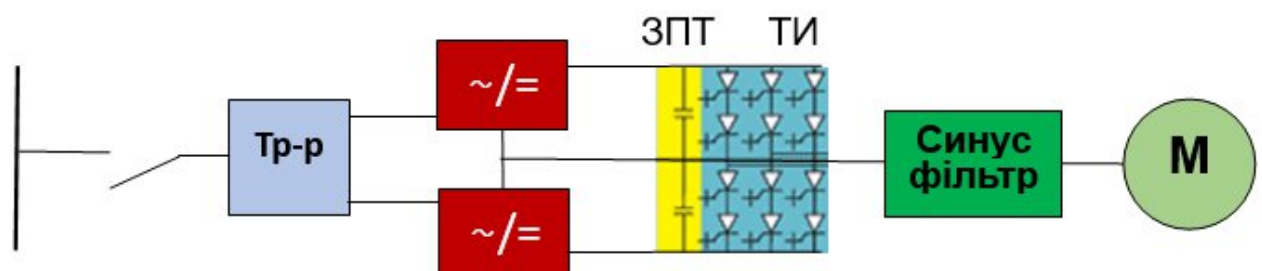



Рисунок 1.15 – Високочастотні перетворювачі тиристорного типу

Напівпровідникові частотні перетворювачі тиристорного типу, попри свої технологічні переваги, характеризуються наявністю декількох суттєвих інженерних недоліків. Ключовою проблемою при їх експлуатації є генерація високого рівня реактивної потужності в мережу, що викликає необхідність інтеграції додаткових компенсуючих пристроїв, ускладнює загальну схему електропостачання та збільшує капітальні витрати.

Крім того, послідовно або паралельно увімкнені силові електронні ключі в таких архітектурах вимагають прецизійного динамічного й статичного узгодження через природний технологічний розкид внутрішніх параметрів напівпровідникових структур. Це значно ускладнює пусконаладжувальні роботи та підвищує кваліфікаційні вимоги до сервісного технічного обслуговування. Загальний показник надійності системи критично залежить від стабільності характеристик самих



тиристорів, які мають низьку ремонтпридатність на рівні окремих компонентів і потребують тривалого часу для юстування контурів керування. Також для забезпечення електромагнітної сумісності та формування якісного вихідного сигналу виникає обов'язкова потреба у встановленні громіздких синусоїдальних фільтрів, що додатково здорожує весь проект.

Водночас даний клас перетворювальних пристроїв володіє вагомими експлуатаційними перевагами, які виправдовують їх впровадження у важкій промисловості. Перш за все, вони відрізняються винятково високою енергетичною ефективністю, оскільки їхній коефіцієнт корисної дії (ККД) у номінальних режимах здатний досягати 97%.

До того ж, тиристорні системи спроможні забезпечувати стійке регулювання в широкому частотному діапазоні від 0 до 300 Гц, дозволяючи гнучко й плавно адаптувати кутову швидкість обертання вала електродвигуна під мінливі графіки технологічного навантаження. Наостанок, завдяки сучасним методам високої щільності компоновання силових шаф, такі агрегати мають відносно компактні масогабаритні параметри, що дозволяє раціонально використовувати робочий простір при їх монтажі в умовах обмежених площ машинних залів.

Високовольтні частотні перетворювачі на базі біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT) на сьогодні є найбільш прогресивним та технологічно досконалим класом пристроїв серед існуючих промислових рішень силової електроніки. Конструктивна архітектура таких агрегатів передбачає інтеграцію сухого вхідного багатообмоткового трансформатора та багатоярусних транзисторних інверторних осередків, які компонуються в межах єдиного моноблочного модуля. Подібне виконання дозволяє постачати обладнання у вигляді готової до експлуатації заводської збірки, що мінімізує обсяг пусконаладжувальних робіт і повністю виключає потребу в проведенні складних додаткових монтажних операцій на місці встановлення.

Фундаментальний фізичний принцип функціонування цих систем аналогічний класичним тиристорним схемам подвійного перетворення енергії, проте застосування повністю керованих IGBT-транзисторів замість напівкерованих тиристорів забезпечує принципово вищий рівень енергетичної ефективності та прецизійний контроль над динамічними процесами комутації. Завдяки високій частоті перемикання транзисторних ключів вдається сформувати практично ідеальну синусоїдальну форму вихідного струму й напруги, що мінімізує гармонічні спотворення та усуває необхідність використання громіздких вихідних фільтрів (рис. 1.16).

Таким чином, завдяки поєднанню високого коефіцієнта корисної дії, покращеної електромагнітної сумісності з мережею та масогабаритної оптимізації, високовольтні перетворювачі частоти на IGBT-транзисторах гарантують максимальну надійність та компактність. Це робить їх найбільш раціональним і зваженим інженерним вибором для інтеграції у

складні, високонапружені автоматизовані процеси сучасних промислових підприємств.

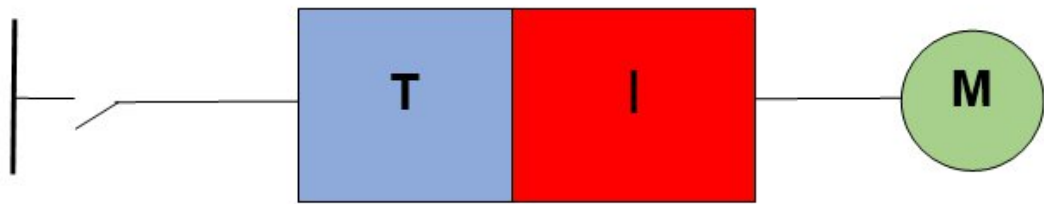


Рисунок 1.16 – Високовольтні частотно-регульовані пристрої на базі IGBT-транзисторів

Високовольтні частотно-регульовані комплекси на базі IGBT-транзисторів володіють значним спектром експлуатаційних переваг, що обумовлюють їх високу ефективність і безвідмовність у важких індустріальних умовах. Ключовий технологічний пріоритет таких систем полягає в інтеграції передових мікроконтролерних систем керування з високою обчислювальною здатністю, які координують режими комутації транзисторних ключів, максимізуючи точність та динамічну стабільність регулювання. Впровадження цієї цифрової компоненти у поєднанні з високою щільністю компонування напівпровідникових структур дозволило кардинально оптимізувати масогабаритні показники пристроїв, забезпечуючи їх компактність і спрощуючи інтеграцію в обмежені простори чинних електротехнічних приміщень.

Важливою інженерною особливістю IGBT-топологій є мінімальний рівень генерації вищих гармонійних складових струму й напруги, завдяки чому мінімізується електромагнітне навантаження на підключене обладнання. За рахунок багатоярусного формування сигналу вихідна напруга набуває практично бездоганної синусоїдальної форми, що дозволяє повністю відмовитися від громіздких синусоїдальних фільтрів та забезпечує універсальну сумісність перетворювача з будь-якими типами електричних машин без ризику пробою їхньої ізоляції. Відсутність потреби у додаткових вихідних трансформаторах та важких фільтрувальних контурах відкриває можливості для реалізації алгоритмів високоточного векторного керування як у замкненому контурі, так і в бездатчикових (бездатчикових векторних) режимах, що спрощує загальну архітектуру привода та знижує його кошторисну вартість.

Додатково ці перетворювальні комплекси відрізняються розширеним діапазоном регулювання вихідної частоти в межах від 0 до 300 Гц, гарантуючи прецизійну адаптацію кутової швидкості електродвигунів під специфічні критерії мінливих технологічних процесів. Поряд із чисельними перевагами, єдиним стримуючим чинником масового впровадження таких пристроїв залишається високий поріг технологічних та наукомістких вимог до виробничої бази, через що далеко не всі

машинобудівні підприємства здатні самостійно реалізувати повний цикл випуску подібної високотехнологічної апаратури.

У промисловій практиці високовольтні частотні перетворювачі цього класу традиційно виступають головним інструментом для керування швидкістю трифазних асинхронних та синхронних двигунів змінного струму високої напруги. Відповідно до прийнятих європейських стандартів, номінальна потужність таких агрегатів варіюється у межах від 160 кВт до 12 МВт, а робочий діапазон напруги живлення охоплює значення від 3 кВ до 11 кВ. За своєю функціональною логікою принципи роботи цих пристроїв корелюють із базовими алгоритмами низьковольтних аналогів, де для широкодіапазонної зміни швидкості від нуля до номіналу система формує на виході інвертора напругу заданої частоти, що відрізняється від параметрів живильної мережі. При цьому безпосередньо силова частина інвертора будується на базі послідовно з'єднаних однофазних двотранзисторних або двотрансформаторних силових осередків, що одержують живлення від секціонованого сухого трансформатора.

Сучасні високовольтні перетворювальні комплекси не лише забезпечують перехід технологічних ліній на рейки енергоефективного споживання, але й виступають дієвим засобом подовження експлуатаційного ресурсу приводних двигунів та супутньої механічної арматури. Реалізація режимів контрольованого плавного пуску та оптимізація поточних робочих параметрів мінімізують пускові струми й динамічні удари в кінематичних парах, що суттєво скорочує поточні витрати на капітальні ремонти та підвищує загальний коефіцієнт готовності всієї виробничої лінії (рис. 1.17).





Рисунок 1.17 – Перетворювач частоти

Завдяки конструктивній простоті високовольтних перетворювачів частоти та уніфікації їхніх інверторних силових осередків, номенклатура та обсяг необхідного комплексу запасних частин (ЗІП) суттєво оптимізуються. Подібна однотипність модулів дозволяє радикально знизити фінансові та часові витрати на підготовку й навчання експлуатаційного персоналу, а також мінімізувати середній час відновлення працездатності обладнання під час проведення планового або аварійного технічного обслуговування.

На сьогодні високовольтні частотно-регульовані приводи знайшли масове застосування в капіталомістких секторах промисловості, зокрема в теплоенергетиці, чорній та кольоровій металургії, централізованому водопостачанні, гірничодобувному комплексі, нафтогазовій та цементній індустрії. У цих сферах вони виступають базовим інструментом для оптимізації роботи важких турбомеханізмів: тягодуттєвих машин і витяжних вентиляторів котельних агрегатів ТЕЦ, потужних доменних повітродувок, магістральних насосних агрегатів, головних вентиляційних установок шахт, а також технологічних газових компресорів та нафтоперекачувальних насосів.

Сучасна апаратна база інверторних силових осередків цих перетворювачів базується на високоякісних IGBT-транзисторах (рис. 1.18), які гарантують високу безвідмовність і динамічну стабільність при взаємодії з високовольтними електричними машинами змінного струму. Застосування багаторівневої ШІМ дозволяє сформувати на виході практично бездоганну синусоїдальну форму напруги, що мінімізує вищі гармоніки в струмі статора двигуна, тоді як використання вхідних випрямляючих пристроїв із багатопульсними схемами та фазовим зсувом ефективно нівелює зворотний гармонічний вплив силової апаратури на живильну електричну мережу підприємства.


У підсумку, інтеграція високовольтних частотних перетворювачів не лише виводить технологічні процеси на рівень високої енергоефективності, а й виступає надійним чинником пролонгації міжремонтного ресурсу всього супутнього обладнання, забезпечуючи комплексну оптимізацію режимів роботи промислових систем.



Рисунок 1.18 – Силовий транзисторний перетворювач частоти на IGBT-ключах

Функціональний потенціал високовольтних частотних перетворювачів охоплює широкий спектр регульовальних та захисних можливостей, конкретний набір яких визначається фірмою-виробником обладнання. Наявність розвиненого інструментарію дозволяє здійснювати прецизійне керування частотою обертання вала електродвигуна навіть у рушійних режимах нестабільного або аварійного за напругою живлення. Сучасні пристрої штатно підтримують режими безударного підхвату блокованого або вільно обертового ротора електричної машини («політ на льоту»), реалізують алгоритми форсованого динамічного гальмування із розсіюванням енергії на гальмівних резисторах, а також виконують комплекс інших спеціалізованих операцій, що гарантують високу живучість, безпеку та енергоефективність технологічного комплексу.

Інтегровані інтелектуальні функції забезпечують безперервний повний моніторинг поточного стану електропривода та діагностику його вузлів. Оперативне відображення параметрів реалізується за допомогою локальних цифрових пультів керування, які монтуються безпосередньо на лицьових панелях силових шаф, або через промислові інтерфейси телекомунікаційного зв'язку. Інтеграція перетворювачів у загальну структуру АСУ ТП за допомогою сучасних мережевих протоколів (Modbus, Profibus, Ethernet IP та інших) відкриває можливість організації повнофункціонального віддаленого доступу до масиву робочих даних у режимі реального часу, дозволяючи виконувати дистанційне



параметрування, диспетчеризацію та превентивний аналіз виникнення несправностей.

Такий підхід забезпечує гнучке юстування та безперервний інженерний контроль за режимами роботи електричних машин на всіх етапах їх тривалої експлуатації, що безпосередньо мінімізує ймовірність аварійних відмов та продовжує міжремонтний ресурс.

У зв'язку з переорієнтацією проектованої топології на використання низьковольтної складової, у межах даної модернізації передбачено впровадження перетворювача частоти з номінальним класом напруги 0,4 кВ. На етапі техніко-економічного обґрунтування та розробки проекту було проведено порівняльний аналіз різноманітних конфігурацій перетворювальної техніки, проте більшість альтернативних високовольтних варіантів виявилися надмірно капіталомісткими та складними з точки зору монтажно-специфіки, утримання й оперативного сервісного обслуговування.


З огляду на комплексний аналіз технічних переваг та економічних критеріїв, найбільш раціональним і зваженим інженерним рішенням для даного об'єкта є застосування перетворювача частоти напругою 0,4 кВ. Зазначений клас обладнання повною мірою гарантує відпрацювання всіх необхідних динамічних і статичних режимів автоматизованого електропривода, суттєво спрощує загальну архітектуру системи керування, а також дозволяє радикально знизити початкові фінансові витрати на будівельно-монтажні роботи та подальшу експлуатацію апаратури.

1.6 Функціональні переваги частотного регулювання електроприводів

Впровадження частотно-регульованих електроприводів забезпечує комплексний позитивний ефект у різних сферах – від масштабних промислових комплексів до об'єктів комерційної інфраструктури та комунального господарства. Системний аналіз експлуатаційних характеристик дозволяє виділити ключові техніко-економічні переваги інтеграції перетворювальної техніки в сучасні технологічні лінії [17].

Головним чинником впровадження регульованого привода виступає радикальне зниження споживання активної електричної енергії. Завдяки здатності частотного перетворювача динамічно адаптувати кутову швидкість ротора двигуна до реальних потреб технологічного процесу, повністю нівелюється проблема невиправданих енергетичних втрат. Цей ефект є найбільш відчутним для агрегатів із вентиляторною (квадратичною) характеристикою моменту навантаження – відцентрових насосів, димососів та вентиляційних установок, графік роботи яких передбачає суттєві добові коливання продуктивності.

Важливою технологічною перевагою є забезпечення контрольованого плавного пуску та безударного зупину електричних машин. Обмеження пускових струмів і виключення різких стрибків



крутного моменту дозволяють мінімізувати динамічні й кінематичні навантаження на пов'язані механічні вузли, редуктори та запірну арматуру. Наслідком демпфування таких збурень є значне уповільнення механічного зносу деталей, зниження аварійності та пролонгація загального експлуатаційного ресурсу обладнання.

Окрім цього, сучасна перетворювальна апаратура гарантує прецизійне відпрацювання заданої швидкості та обертального моменту на валу двигуна, що є базовою умовою для оптимізації складних виробничих циклів і нарощування загальної продуктивності ліній. Висока точність підтримки параметрів безпосередньо впливає на стабільність геометричних або фізико-хімічних показників кінцевого продукту, мінімізуючи відсоток виробничого браку.


Зниження операційних та експлуатаційних витрат досягається синергетичним ефектом від економії електроенергії, скорочення обсягів планового технічного обслуговування та зменшення витрат на капітальні ремонти. Додаткова оптимізація кошторису проекту реалізується завдяки тому, що розвинений внутрішній функціонал перетворювача частоти часто дозволяє відмовитися від розгортання дублюючих зовнішніх систем захисту, локальної автоматики та пускової апаратури.

Сучасні цифрові інструменти інтеграції забезпечують безперешкодне включення частотних перетворювачів у багаторівневі автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП). Завдяки вбудованій підтримці поширених промислових мережевих інтерфейсів і протоколів зв'язку, з'являється можливість розгортання систем дистанційного моніторингу, оперативного диспетчерського контролю та превентивної віддаленої діагностики параметрів привода в режимі реального часу.

Вагому роль відіграє комплексний мікропроцесорний захист самого електродвигуна та супутньої мережевої інфраструктури від критичних і аномальних режимів роботи, таких як тривалі струмові перевантаження, міжфазні короткі замикання, перенапруги в ланці постійного струму або обриви фаз. Наявність швидкої електронної відсічки мінімізує ризик пошкодження обмоток та виключення тривалих простоїв виробництва.

Додатковим екологічним та ергономічним чинником є зниження рівнів акустичного шуму та вібраційних навантажень за рахунок вибору оптимальних робочих частот та зміни частоти комутації інвертора. Дана особливість має вирішальне значення під час проектування систем кондиціонування й вентиляції повітря для об'єктів із підвищеними санітарними вимогами до життєвого середовища, зокрема офісних центрів, готельних комплексів чи лікувальних закладів.

Наостанок, гнучкість архітектури та широка номенклатурна лінійка роблять частотні перетворювачі універсальним інженерним засобом. Вони однаково ефективно адаптуються під вимоги як малопотужних локальних побутових пристроїв, так і надважких багатопровідних



промислових конвеєрів та магістральних агрегатів, незалежно від специфіки зовнішніх експлуатаційних умов.


1.7 Сучасні тенденції та інновації в галузі частотних перетворювачів

Сучасний етап розвитку перетворювальної техніки характеризується інтенсивним впровадженням інноваційних рішень та фундаментальними технологічними досягненнями. Стрімка еволюція апаратної та програмної складових відкриває нові вектори вдосконалення архітектури частотно-регульованих приводів, безпосередньо впливаючи на ефективність їх інтеграції в автоматизовані комплекси.

Одним із найбільш значущих інноваційних трендів у сфері промислової автоматизації є глибока інтеграція частотних перетворювачів із концепцією Промислового Інтернету речей (IIoT). Завдяки розширенню комунікаційних можливостей, сучасні пристрої набувають здатності до повноцінної мережевої взаємодії, безперервного збору та прецизійного аналізу масивів робочих даних у режимі реального часу. Це дозволяє організувати надійний віддалений моніторинг та диспетчеризацію електроприводів через глобальну мережу Інтернет, надаючи операторам можливість контролювати ключові параметри обладнання з будь-якої локації. Як наслідок, суттєво мінімізуються витрати на утримання виїзних сервісних бригад та забезпечується миттєве реагування на виникнення позаштатних ситуацій.

Крім того, накопичення великих обсягів телеметричної інформації про поточний стан приводних вузлів створює підґрунтя для застосування передових аналітичних інструментів. Системний аналіз зібраних даних дозволяє виявляти приховані експлуатаційні аномалії, оптимізувати енергоспоживання відповідно до миттєвих потреб технологічного процесу та гнучко коригувати режими роботи двигунів задля досягнення максимальної продуктивності при мінімальних витратах ресурсів. Важливим аспектом індустріальної інтернет-інтеграції є також перехід на якісно новий рівень безпеки та живучості виробництва. Вбудовані діагностичні модулі автоматично верифікують дефекти на ранніх стадіях їх зародження, формуючи попереджувальні сигнали для персоналу, що дозволяє проводити профілактичне обслуговування без зупинки ліній та уникати масштабних аварій.

Єдина цифрова платформа, що створюється шляхом об'єднання IIoT-орієнтованих перетворювачів з іншими локальними системами автоматизації підприємства, максимізує синергетичний ефект від координації всіх ланок виробництва [8]. Водночас підключення силового обладнання до глобальних інформаційних мереж формує нові виклики у сфері інформаційної безпеки. Потенційна вразливість систем перед кібератаками вимагає від інженерів обов'язкового впровадження суворих заходів криптографічного захисту, ізоляції промислових протоколів та організації багаторівневого контролю доступу до керуючих контурів.



Паралельно з мережевою інтеграцією розвивається напрям створення інтелектуальних систем керування частотними перетворювачами, які базуються на алгоритмах штучного інтелекту та машинного навчання. Головною рисою таких інтелектуальних приводів є здатність до самоналаштування та динамічної адаптації робочих параметрів під мінливі чинники навколишнього середовища (коливання моменту навантаження, температурні дрейфи, поточний ступінь механічного зносу вузлів). Спираючись на математичні моделі предиктивного аналізу, інтелектуальні модулі з високою точністю прогнозують залишковий ресурс критичних компонентів і локалізують несправності.


Завдяки розвиненим інтерфейсам взаємодії, ці пристрої легко інтегруються у вертикально-структуровані ієрархічні системи керування верхнього рівня, такі як SCADA, MES та ERP, забезпечуючи наскрізну прозорість матеріальних та енергетичних потоків. У підсумку використання адаптивних алгоритмів дозволяє значно знизити питомі витрати на ремонтну базу й утримання парку обладнання, гарантуючи швидку окупність початкових капіталовкладень, які на етапі впровадження наукомістких систем можуть бути доволі значними.

Серед інших пріоритетних напрямів еволюції перетворювальної техніки чітко виділяються жорсткі вимоги до підвищення енергоефективності, мініатюризації та вдосконалення алгоритмів керування. Сучасні архітектури будуються на базі високотехнологічних напівпровідникових матеріалів, що дозволяє створювати надкомпактні габаритні виконання пристроїв із повним збереженням або розширенням їх функціоналу. Це значно спрощує монтаж шаф керування в умовах обмеженого простору.

У частині систем автоматичного регулювання стандартом стало застосування високоточного векторного керування та прямого керування моментом (DTC), що гарантує бездоганну динаміку привода у високотехнологічних галузях, де критичною є прецизійна стабілізація кутової швидкості. Також значна увага приділяється посиленню внутрішніх апаратних захистів від перенапруг і замикань, а також екологічним аспектам виробництва, що включають використання матеріалів, придатних до повної вторинної переробки (Green Technology), та мінімізацію вуглецевого сліду за рахунок глобального енергозбереження.

Аналізуючи комплексні виклики та бар'єри, які виникають під час впровадження перетворювачів частоти, необхідно виділити наступні стримуючі чинники:

- високий поріг первинних інвестицій: розгортання масштабних частотно-регульованих систем вимагає значних фінансових вкладень, які охоплюють не лише вартість самої силової апаратури, але й витрати на будівельно-монтажні, пусконаладжувальні роботи, інтеграцію суміжних систем та навчання персоналу;



- складність системної інтеграції: поєднання новітніх перетворювачів із застарілим парком технологічного обладнання, різнотипними датчиками та контролерами нижнього рівня вимагає вирішення складних завдань апаратної та програмної сумісності;

- підвищені критерії надійності: функціонування в межах безперервних і критично важливих промислових процесів зобов'язує здійснювати ретельний моніторинг стану пристроїв та розгортати безвідмовні контури захисту від мережевих аномалій;

- загрози кібербезпеки: підключення приводів до інформаційних мереж збільшує ризики несанкціонованого віддаленого доступу, що накладає додаткові зобов'язання щодо кіберзахисту даних та підвищення кваліфікації IT-кадрів підприємства;

- проблема електромагнітної сумісності: високочастотна комутація силових ключів інвертора призводить до погіршення якості електроенергії в мережі живлення через генерацію вищих гармонік, що змушує передбачати додаткові витрати на встановлення фільтрувального обладнання.

Попри наявні виклики, стратегічні перспективи впровадження частотних перетворювачів у промислове виробництво є безальтернативними та відкривають значні операційні можливості:

- максимізація показників енергоефективності: точне узгодження обертової швидкості вала двигунів із поточними параметрами навантаження забезпечує радикальне зниження споживання електричної енергії та оптимізацію витрат;

- мінімізація операційних витрат: плавні пускові режими суттєво зменшують механічний знос кінематичних пар, підшипникових вузлів та арматури, пролонгуючи міжремонтний інтервал і знижуючи витрати на сервіс;

- підвищення якості та продуктивності: високоточне відпрацювання технологічних координат дозволяє стабілізувати параметри виробничих ліній, оптимізувати якість кінцевої продукції та знизити відсоток дефектів;

- висока технологічна гнучкість: можливість оперативного переналаштування параметрів системи без зупинки виробничого циклу підвищує адаптивність та загальну конкурентоспроможність підприємства;

- ефективне включення в єдиний інформаційний простір: сумісність із сучасними стандартами автоматизації (SCADA, MES, ERP) дозволяє будувати прозорі цифрові платформи для комплексного управління підприємством;

- відповідність екологічним стандартам: системне зниження енергоспоживання безпосередньо корелює зі зменшенням екологічного навантаження на довкілля та скороченням викидів парникових газів, сприяючи реалізації концепції сталого розвитку.

2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

В таблиці 1.1 представлені характеристики насосних агрегатів насосної станції мартенівського цеху.

2.1 Розрахунок потужності на валу насоса

Для визначення необхідної потужності електродвигуна спочатку проведемо розрахунок номінальної потужності на валу насосного агрегату (P , кВт). Розрахунок базується на параметрах об'ємної сили потоку рідини та паспортному коефіцієнті корисної дії (ККД) гідротехнічної установки за інженерною формулою:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_n} \quad (2.1)$$

де ρ - густина середовища, що перекачується (для чистої технічної води контуру охолодження $\rho=1000$ кг/м³);

g - прискорення вільного падіння (9,81 м/с²);

Q - об'ємна подача насоса (600 м³/год);

H - гідродинамічний напір (90 м);

η_n - коефіцієнт корисної дії насоса (77%=0,77).

Для спрощення розрахунків при подачі рідини в м³/год скористаємося уніфікованим практичним виразом:

$$P = \frac{Q \cdot H}{367 \cdot \eta_n} = \frac{600 \cdot 90}{367 \cdot 0,77} = \frac{54000}{282,59} \approx 191,09 \text{ кВт} \quad (2.2)$$

Розрахунок встановленої потужності двигуна з урахуванням коефіцієнта запасу.

Електрична машина повинна мати запас потужності для компенсації можливих перевантажень у пускових режимах, при зміні гідравлічного опору мережі або коливаннях параметрів рідини. Для силових гідроагрегатів потужністю понад 50 кВт інженерний коефіцієнт запасу приймається в межах $k_3=1,1 \dots 1,15$.

Враховуючи, що в проекті впроваджується частотно-регульований електромеханічний привід (ЧПД) із системою підпорядкованого керування, яка обмежує пускові струми на рівні 1,5-І н, приймаємо мінімальний коефіцієнт запасу $k_3=1,1$.

Розрахункова встановлена потужність двигуна ($P_{уст}$, кВт) становить:

$$P_{уст} = P \cdot k_3 = 191,09 \cdot 1,1 = 210,2 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Вибір номінальної потужності двигуна за каталогом.

Відповідно до промислового ряду номінальних потужностей трифазних асинхронних двигунів, найближчим більшим стандартним значенням до розрахованого (210,2 кВт) є номінал 250 кВт.

«На основі гідравлічних розрахунків параметрів водопостачання ($Q=600 \text{ м}^3/\text{год}$, $H=90 \text{ м}$) та з урахуванням коефіцієнта запасу $k_3=1,1$, необхідна встановлена потужність приводного механізму складає 210,2 кВт. За каталогом промислового електрообладнання до встановлення приймається трифазний асинхронний електродвигун серії AIP355S4 з номінальною потужністю 250 кВт та синхронною частотою обертання 1500 об/хв, що повністю перекриває розрахунковий діапазон навантажень насосного агрегату».

2.2 Розрахунок і вибір елементів системи керування перетворювача частоти

На рисунку 2.1 представлена силова схема перетворювача частоти для керування асинхронним електродвигуном з коротко замкнутим ротором проектуемого електроприводу.

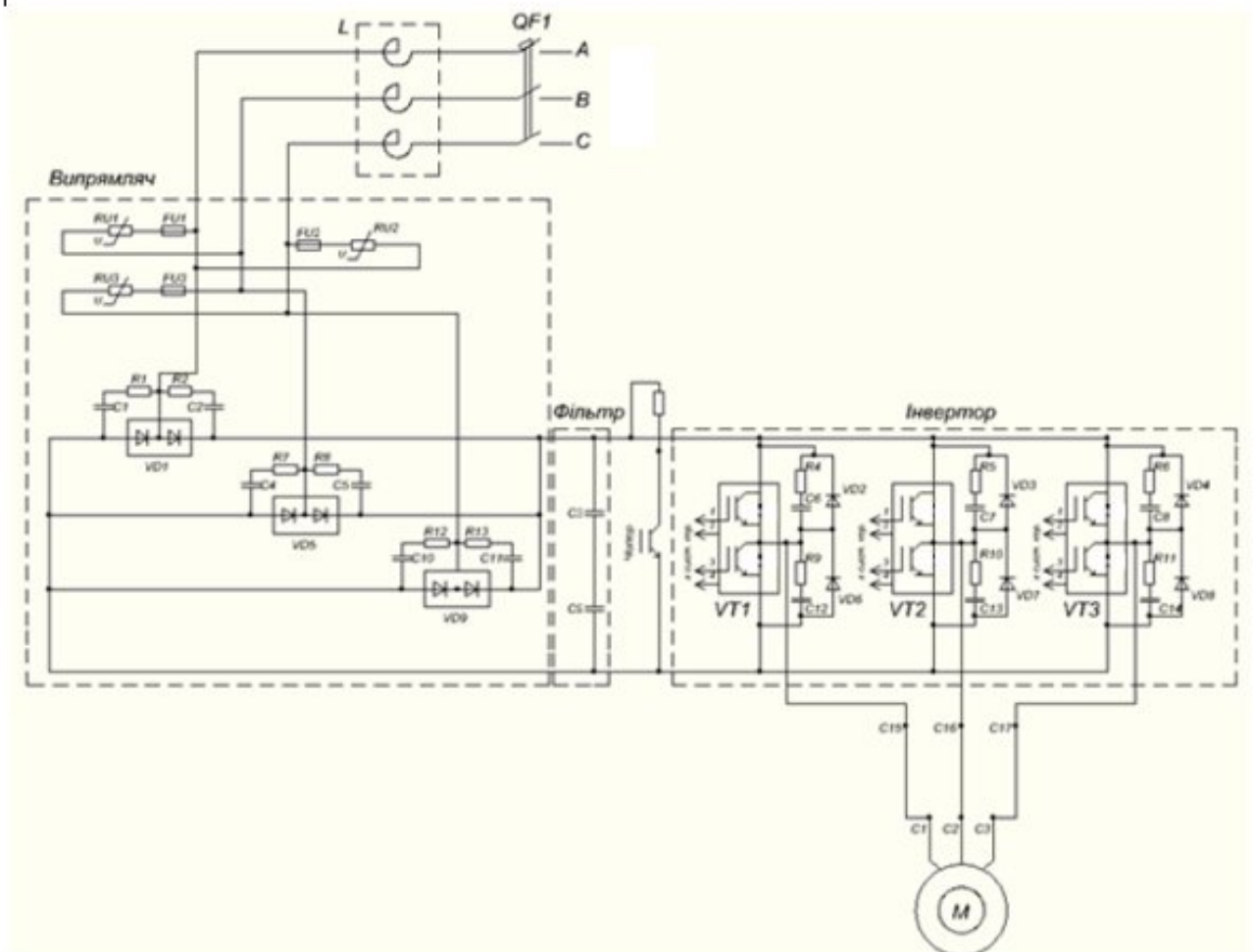


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема

2.2.1 Визначення номінальних параметрів випрямляча

Визначаємо номінальну напругу випрямляча в В:

$$U_{\text{випр}} = 2,34 \cdot U_{\text{ф.ном}} \quad (2.4)$$

де $U_{\text{ф.ном}}$ – фазна напруга.

$$U_{\text{випр}} = 2,34 \cdot 380 = 889,2 \text{ В}$$

Визначаємо необхідний випрямлений струм в А:

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{P_{\text{розр}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot \cos \varphi_{\text{дв}} \cdot U_{\text{дн}}} \quad (2.5)$$

де $P_{\text{розр}}$ – механічна потужність приводу;

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД двигуна;

$\cos \varphi_{\text{дв}}$ – коефіцієнт потужності двигуна.

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{200 \cdot 10^3}{0,956 \cdot 0,89 \cdot 380} = 618,58 \text{ А.}$$

Визначаємо номінальний лінійний струм в А, який споживає випрямляч

$$I_{\text{л.ном}} = I_{\text{в.ном}} \cdot 0,817 \cdot 1,05 \quad (2.6)$$

$$I_{\text{л.ном}} = 618,58 \cdot 0,817 \cdot 1,05 = 530,65 \text{ А.}$$

2.2.2 Визначення параметрів та вибір струмообмежувального реактора

Струмообмежувальні реактори включаються в коло змінного струму перетворювальної установки з метою зниження струмів короткого замикання при виникненні аварійних режимів, а також для послаблення впливу комутаційних процесів на мережу живлення. Основним завданням розрахунку реактора є забезпечення такого рівня обмеження струмів короткого замикання, який буде безпечним для вентилів упродовж часу дії захисної апаратури. Значення індуктивності реактора підбирається таким чином, щоб при номінальному струмі падіння напруги на його виводах складало близько 5 % від номінальної напруги.

Індуктивний опір фази реактора визначається в Ом:

$$X_L = \frac{0,05 \cdot U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{л.ном}}}, \quad (2.7)$$

де

$$U_{\text{ф.ном}} = \frac{U_{\text{л.ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$$

$$X_L = \frac{0,05 \cdot 220}{530,65} = 0,02 \text{ Ом}$$

Визначаємо індуктивність реактора в Гн:

$$L_r = \frac{X_L}{\omega}, \quad (2.8)$$

де

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_M, \quad (2.9)$$

f_M – частота живлячої мережі, $f_M = 50$ Гц

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ Гц}$$

$$L_r = \frac{0,02}{314} = 0,0000634 \text{ Гц.}$$

При виборі реактора повинні виконуватися умови:

$$\begin{aligned} U_p, \text{ В} &> U_{\text{ф.ном}}, \text{ В} \\ I_p, \text{ А} &> I_{\text{п.ном}}, \text{ А} \\ L_p, \text{ Гн} &> L_r, \text{ Гн} \end{aligned}$$

По розрахункових даним вибираю реактор з наступними характеристиками: $U_{\text{ном.р}} = 410$ В; $I_{\text{ф.ном.р.}} = 660$ А; $L_{\text{г.ном.р.}} = 0,0064$ Гн; $R_{\text{ном.р.}} = 2,1$ мОм.

2.2.3 Визначення параметрів та вибір силових елементів тиристорно-діодного модуля випрямляча


Попередній вибір тиристорно-діодного модуля виконується по двом параметрам:

- 1) $I_{\text{сerr}}$ – середній робочий розрахунковий струм вентеля;
- 2) $U_{\text{зврi}}$ – зворотня розрахункова імпульсна напруга, що повторюється на вентелі.

2.2.4 Обчислення струму силового вентиля

Визначаємо середній струм вентиля для трифазної мостової схеми в А:

$$I_{\text{с.в.}} = \frac{I_{\text{в.ном}}}{3}, \quad (2.10)$$


$$I_{с.в.} = \frac{618,58}{3} = 206,19 \text{ А.}$$

Визначаємо середній робочій струм модуля з урахуванням системи охолодження в А:

$$I_{сер.р.} = \frac{I_{ср}}{K_{зап}}, \quad (2.11)$$

де $K_{зап}$ – коефіцієнт запасу, який враховує умови охолодження модуля;
 $K_{зап} = 0,5$ – охолодження штучно повітряне.

$$I_{сер.р.} = \frac{206,18}{0,5} = 412,39 \text{ А.}$$

2.2.5 Визначення напруги вентилів модуля

Визначаємо розрахункову зворотну напругу вентиля в В:

$$U_{звр} = U_{bmax} \cdot K_{кп} \cdot K_3, \quad (2.12)$$

де $K_{кп}$ - коефіцієнт, який враховує комутаційні перенапруження. $K_{кп} = 1,4$
 K_3 – коефіцієнт запасу. $K_3 = 1,1$
 U_{bmax} – розрахункова зворотна напруга в В:

$$U_{bmax} = \sqrt{6} \cdot U_{ф.ном} \cdot 1,15, \quad (2.13)$$

де 1,15 – коефіцієнт, який враховує комутаційні перенапруження

$$U_{bmax} = \sqrt{6} \cdot 220 \cdot 1,15 = 619,72 \text{ В}$$

$$U_{звр} = 619,72 \cdot 1,4 \cdot 1,1 = 954,37 \text{ В.}$$

Визначаємо зворотно імпульсну напругу вентиля в В, яка повторюється:

$$U_{зврi} = \frac{U_{звр}}{K_p}, \quad (2.14)$$

де $K_p = 0,75$ - співвідношення між робочою та імпульсною допустимою напругою, що повторюється на вентелі.

$$U_{зврi} = \frac{954,37}{0,75} = 1272,49 \text{ В.}$$

При виборі модуля повинні виконуватись умови:

$$U_{зврї}, В < U_{звімод}, В$$

$$I_{серр}, А < I_{мод}, А$$

У відповідності з розрахунковими даними вибираю тиристорно-діодний модуль.

Характеристики вибраного модуля:

- 1) $I_{F(AV)}$ - максимально допустимий середній прямий струм. $I_{F(AV)} = 800 А$;
- 2) U_{DRM} - імпульсна напруга, що повторюється. $U_{DRM} = 1600 В$;
- 3) U_0 - порогова напруга вольт-амперної характеристики. $U_0 = 1,05 В$;
- 4) R_d - динамічний опір вольт-амперної характеристики. $R_d = 0,00017 Ом$;
- 5) $I_{уд.д}$ - ударний струм діода. $I_{уд.д} = 23 кА$;
- 6) $T_{стр.доп}$ - максимально допустима температура напівпровідникової структури. $T_{стр.доп} = 130 °С$;
- 7) $R_{теп}$ - тепловий опір напівпровідниковий перехід - середа.
- 8) $R_{теп} = 0,042 °С/Вт$;
- 9) $i^2 \times t$ - інтеграл плавлення напівпровідникової структури вентеля. $i^2 \times t = 2645 кА^2 \times с$;
- 10) Q_r - заряд зворотнього відновлення вентеля модуля. $Q_r = 175 мкКл$;
- 11) t_{rr} - час відновлення вентеля модуля. $t_{rr} = 10 мкс$.

Виконуємо перевірку вибраного модуля по тепловому режиму.

Визначаємо витрати у вентилі в Вт:

$$P_B = U_0 \cdot I_{серр} \cdot \left(1 + K_{\phi}^2 \cdot I_{серр} \frac{R_d}{U_0}\right), \quad (2.15)$$

де K_{ϕ} - коефіцієнт форми анодного струму вентеля, $K_{\phi} = 1,57$.


$I_{серр}$ - середній струм вентеля

$$P_B = 1,05 \cdot 412,39 \cdot \left(1 + 1,57^2 \cdot 412,39 \cdot \frac{0,00017}{1,05}\right) = 504,27 Вт.$$

Визначаємо температуру напівпровідникової структури модуля в стаціонарному режимі у °С:

$$T_{стр} = T_{дов} + R_{теп} \cdot P_B, \quad (2.16)$$

де $T_{дов}$ - температура довколишнього середовища, $T_{дов} = 40 °С$.


$$T_{\text{стр}} = 40 + 0,042 + 504,27 = 61,18 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Для забезпечення нормальної роботи діода повинна виконуватися умова:

$$T_{\text{стр}} \text{ } ^\circ\text{C} < T_{\text{стр доп}} \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$61,18 \text{ } ^\circ\text{C} < 130 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура напівпровідникового елемента не повинна перевищувати встановлене допустиме значення.

Далі здійснюється перевірка обраного діода за умовами захисного показника. Розрахунок виконується для найскладнішого аварійного режиму внутрішнього короткого замикання, який може виникнути внаслідок пробією вентиля в момент завершення процесу комутації. За таких умов модуль повинен зберігати працездатність і не зазнавати пошкоджень.

Повний опір кола короткого замикання визначається в Ом:

$$Z_a = 2 \cdot \sqrt{R_r^2 + X_L^2}, \quad (2.17)$$

де R_r – активний опір обмотки реактора. $R_r=0,0081\text{Ом}$;

X_L – індуктивний опір обмотки реактора в Ом.

$$X_L = L_r \cdot \omega, \quad (2.18)$$

де

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_M, \quad (2.19)$$

f_M – частота живлячої мережі, $f_M = 50 \text{ Гц}$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ Гц}$$

$$X_L = 0,00064 \cdot 314 = 0,201 \text{ Ом}$$

$$Z_a = 2 \cdot \sqrt{0,0081^2 + 0,201^2} = 0,402 \text{ Ом}.$$

Визначаємо базисний струм короткого замикання в А:

$$I_6 = \frac{U_{\text{ф.ном}}}{Z_a}, \quad (2.20)$$

$$I_{\sigma} = \frac{220}{0,402} = 547,26 \text{ A}$$

Виходячи з величини відношення $\frac{R_a}{X_a} = \frac{0,0081}{0,402} = 0,02$ по графіку (рис. 2.2) визначаємо $K_{уд}$.

$$K_{уд} = 1,7$$

Визначаємо ударний струм короткого замикання в А:

$$I_{уд, max} = K_{уд} \cdot I_{\sigma}, \quad (2.21)$$

$$I_{уд, max} = 1,7 \cdot 547,26 = 930,34 \text{ A.}$$

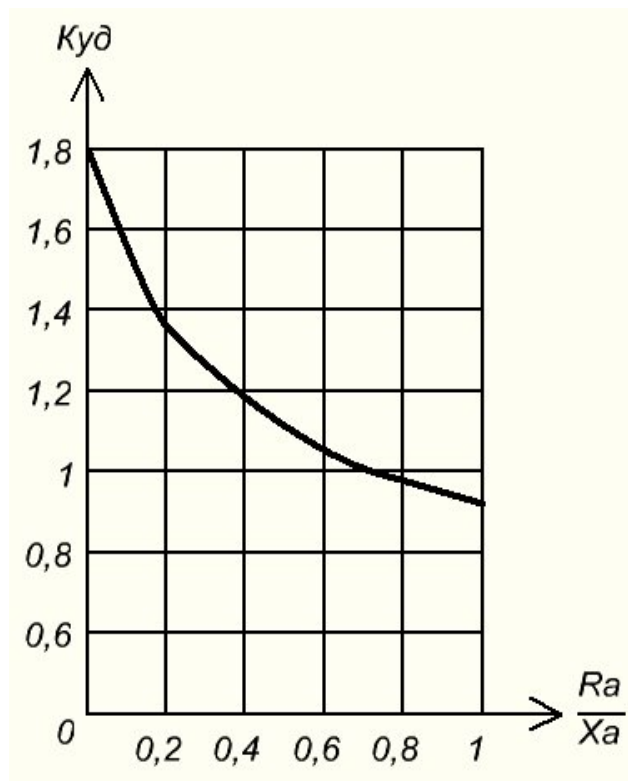


Рисунок 2.2 – Графік залежності $K_{уд}$, від $\frac{R_a}{X_a}$

Виходячи з величини відношення $\frac{R_a}{X_a}$ по графіку (рисунок 2.3) визначаємо $(i^2 \cdot t) \cdot 10^{-3} = 19 \cdot 10^{-3}$.

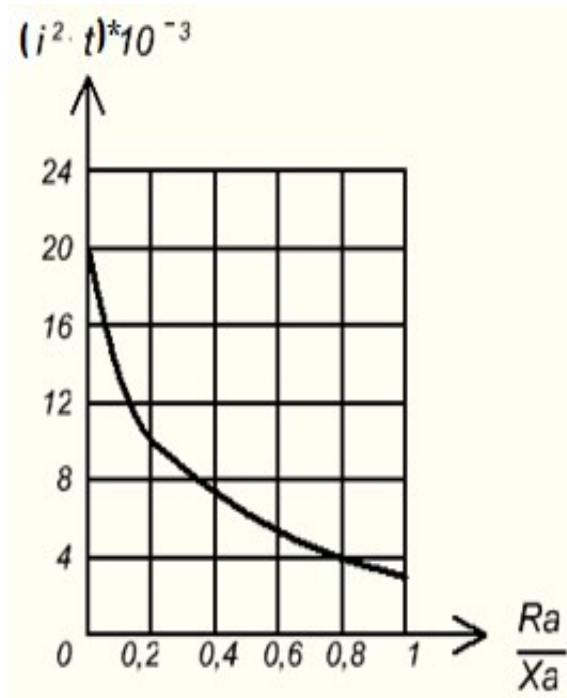


Рисунок 2.3 – Графік залежності $(i^2 \cdot t) \cdot 10^{-3}$ від $\frac{Ra}{Xa}$

Визначаємо максимальний тепловий еквівалент струму короткого замикання в A^2c :

$$(i^2 \cdot t)_{max} = I_6^2 \cdot (i^2 \cdot t) \cdot 10^{-3}, \quad (2.22)$$

$$(i^2 \cdot t)_{max} = 930,34^2 \cdot 19 \cdot 10^{-3} = 16455,2 A^2c.$$

Повинні виконуватись умови:

$$I_{уд.мод}, A > I_{уд.мах}, A,$$

$$23000, A > 930,34, A.$$

$$(i^2 \cdot t)_{мод}, A^2c > (i^2 \cdot t)_{мах}, A^2c.$$

$$2645000, A^2c > 35542, A^2c.$$

З урахуванням температури напівпровідникової структури обраний модуль відповідає вимогам за захисними показниками, оскільки необхідні умови виконуються.

2.2.6 Визначення параметрів та вибір елементів RC-кола

Під час роботи вентиляного перетворювача через наявність індуктивних елементів та значну швидкість зміни струму виникають

імпульсні перенапруження, величина яких може суттєво перевищувати номінальну напругу мережі. Такі комутаційні перенапруження здатні спричинити пошкодження силових вентилів. Окрім цього, на перетворювач впливають перенапруження з боку мережі змінного струму, що виникають у результаті вимкнення потужних індуктивних навантажень, зокрема живильних реакторів, а також атмосферних явищ, зокрема грозових розрядів.

Для зменшення впливу комутаційних перенапружень застосовують захисні RC-ланцюги, які підключаються паралельно силовим вентилям. Захист від перенапружень з боку мережі забезпечується варисторами, що вмикаються паралельно фазам силових кіл змінного струму.

Індуктивність комутаційного контуру визначається в Гн:

$$L_k = 2 \cdot L_{r.\text{НОМ}}, \quad (2.23)$$

де $L_{r.\text{НОМ}}$ - номінальна індукція реактору,

$$L_k = 2 \cdot 0,0064 = 0,0128 \text{ Гн.}$$

Визначаємо амплітуду зворотного струму в А:

$$I_{\text{звор.маx}} = \frac{Q_r}{t_{rr}}, \quad (2.24)$$

де Q_r – величина накопиченого заряду. $Q_r=175$ мкКл
 t_{rr} – час зворотного відновлення. $t_{rr}=10$ мкс

$$I_{\text{звор.маx}} = \frac{175}{10} = 17,5 \text{ А.}$$

Для розрахунку параметрів індивідуальних захисних RC-кола (демпферних контурів), які забезпечують обмеження комутаційних перенапруг на силових напівпровідникових вентилях (тиристорах), використовується енергетичний метод балансу часток потужності. В основі цього методу лежить інженерна умова, що вся кінетична енергія, яка накопичена в індуктивності комутації L_k в момент відновлення запірних властивостей вентиля, повинна повністю перейти в електричну ємність захисного конденсатора. При цьому амплітуда напруги на обкладках конденсатора в кінці інтервалу замикання не повинна перевищувати гранично допустимого значення для обраного класу напівпровідника $U_{c.\text{маx}} = U_{\text{DRM}} = 1600 \text{ В.}$

$$C \cdot \frac{U_{c.\text{маx}}^2}{2} = L_k \cdot \frac{I_{\text{звор.маx}}^2}{2},$$

$$C = L_K \cdot \frac{I_{звор.max}^2}{U_{с.max}^2}, \quad (2.25)$$

$$C = 0,0128 \cdot \frac{17,5^2}{1600^2} = 1,53 \text{ мкФ.}$$

При виборі конденсатора повинні виконуватися умови:

$$U_{ном.р, В} \geq U_{ф.ном, В},$$

$$C_{ном.р, мкФ} \geq C, \text{ мкФ},$$

Зважаючи на отримані розрахункові значення, для реалізації індивідуальних демпферних RC-контурів силових напівпровідникових вентилів обираємо промисловий зразок конденсатора з такими номінальними параметрами: $U_{ном.р}=1600 \text{ В}$; $C_{ном.р}= 2 \text{ мкФ}$.

2.2.7 Розрахунок параметрів захисного резистора

Опір резисторів визначається з урахуванням забезпечення таких умов:

струм розряду конденсатора не повинен перевищувати допустиме значення для вентиля і, як правило, становить не більше 10–15 % від його номінального струму;

протягом часу, коли вентиль перебуває у відкритому стані, конденсатор має повністю або практично повністю розрядитися до моменту закривання вентиля.

На підставі наведених умов розраховуємо опір резистора, Ом:

$$R = \frac{U_{d.max}}{0.1 \cdot I_{вент}}, \quad (2.26)$$

де $I_{вент}$ - струм на вентилі випрямляча;

$U_{d.max}$ - максимальна напруга на вентилі випрямляча.

$$R = \frac{1600}{0.1 \cdot 800} = 20 \text{ Ом.}$$

Визначаємо сталу часу розрядки RC – кола у мкс:

$$\begin{aligned} \tau_p &= R \cdot C, \\ \tau_p &= 20 \cdot 1,53 = 30,6 \text{ мкс.} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Визначаємо потужність, яка розсіюється в резисторі захисного ланцюга в Вт:

$$P_p = C \cdot U_{d,max}^2 \cdot f_M, \quad (2.28)$$

$$P_p = 1,53 \cdot 10^{-6} \cdot 1600^2 \cdot 50 = 19,6 \text{ Вт.}$$

За результатами розрахунків обрано конденсатор з такими характеристиками: $R_{ном.р}=20 \text{ Ом}$; $P_{ном.р}=20 \text{ Вт}$.

2.2.8 Розрахунок основних параметрів варистора та його вибір

Для забезпечення захисту електричних кіл широко застосовуються варистори — нелінійні резистивні елементи, опір яких різко зменшується при перевищенні напругою встановленого порогового значення. Основними параметрами варистора є напруга спрацювання, енергія імпульсу перенапруги, яку елемент здатний поглинути без пошкодження, а також допустима потужність розсіювання.

Під час розрахунку системи захисту в реакторному виконанні джерелом перенапруги з боку живильної мережі, як правило, є струмообмежувальний реактор у момент вимкнення силового автоматичного вимикача.

Енергія, накопичена в обмотках реактора, визначається за виразом у Дж:

$$W_{вар} = \frac{L_p \cdot I_{max}^2}{2}, \quad (2.29)$$

де L_p — індуктивність фази реактора;

I_{max} — максимальний струм фази реактора при перевантаженнях в А:

$$I_{max} = 1,5 \cdot I_{л.ном}, \quad (2.30)$$

$$I_{max} = 1,5 \cdot 660 = 990 \text{ А}$$

$$W_{вар} = \frac{0,00064 \cdot 990^2}{2} = 313,63 \text{ Дж}$$

Класифікаційну напругу у В вибираємо рівною :

$$U_k = 1,15 \cdot U_{вр}, \quad (2.31)$$

$$U_k = 1,15 \cdot 1600 = 1840 \text{ В}$$

При виборі варистора повинні виконуватися умови:

$$W_{вар.р, Дж} < W_{вар, Дж}, \quad (2.32)$$

$$U_K, B < U_{\text{вар}}, B.$$

Обираю оксидоцинкові варистори типу K20 . Допустима енергія розсіювання $W_{\text{вар,доп}} = 320$ Дж. , $U_{\text{вар}} = 2000$ В.

2.2.9 Вибір і розрахунок параметрів конденсаторного фільтра

Розрахунок ємності конденсаторного фільтра виконується на основі таких умов:

- 1) визначення допустимого рівня пульсацій напруги з урахуванням допустимих втрат потужності, які впливають на нагрівання конденсатора;
- 2) визначення допустимого значення струму, що проходить через електроди та контактні з'єднання обкладок конденсатора.

Амплітуда напруги на конденсаторі визначається у Вольтах:

$$U_{c.max} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot U_{\text{л.ном}}, \quad (2.33)$$

$$U_{c.max} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot 380 = 618 \text{ В.}$$

Визначаємо необхідну ємність конденсатора в мкФ:

$$C_{\text{ф}} = I_{d.ном} \cdot \frac{t_{\text{п}}}{\Delta U_{d.ном}}, \quad (2.34)$$

де $t_{\text{п}}$ – час паузи при ШІМ – модуляції. $t_{\text{п}} = 62,5$ мкс

$f_{\text{роб}}$ – робоча частота ШІМ – модуляції. $f_{\text{роб}} = 8$ кГц;

$\Delta U_{\text{пульс}}$ – допустима амплітуда пульсації напруги при робочій частоті $f_{\text{роб}}$ ШІМ – модуляції, $\Delta U_{\text{пульс}} = 1,5$ В

$I_{d.ном}$ – номінальний струм двигуна А:

$$I_{d.ном} = \frac{P_{d.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{d.ном} \cdot \eta_{d.ном} \cdot \cos \varphi}, \quad (2.35)$$

$$I_{d.ном} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,956 \cdot 0,89} = 357,14$$

$$C_{\text{ф}} = 357,14 \cdot \frac{62,5 \cdot 10^{-6}}{1,5} = 14880 \text{ мкФ.}$$

За результатами розрахунків обрано конденсатор з такими характеристиками: $U_p = 630$ В; $C_{\text{ном}} = 4300$ мкФ.

Даний конденсатор не задовольняє за показниками ємності, тому з'єднуємо чотири конденсатори у паралель

$$C_{\text{ном}} = 4 \cdot 4300 = 17200 \text{ мкФ}$$

2.2.10 Визначення параметрів та вибір силового транзистора

Силкові транзистори належать до повністю керованих напівпровідникових приладів. На відміну від тиристорів, їх можна як вмикати, так і вимикати у будь-який момент за наявності напруги необхідної полярності. Для тиристорів вимкнення можливе лише після зменшення анодного струму до нульового значення або зміни його напрямку.

У силових транзисторах відсутній позитивний зворотний зв'язок у режимі провідності, тому їх стійкість до струмових перевантажень є нижчою, ніж у тиристорів. Тиристри здатні витримувати перевантаження за струмом, що у 5–10 разів перевищують номінальні значення, тоді як для транзисторів допустимий рівень перевантаження визначається зниженням коефіцієнта підсилення у біполярних транзисторах або збільшенням опору провідного каналу у польових транзисторах. Для правильно підібраних транзисторів коефіцієнт перевантаження зазвичай не перевищує 2–2,2 від номінального струму.

Подібно до тиристорів, силові транзистори є чутливими до перевищення допустимих перенапруг. Гранично допустимі температури напівпровідникових структур транзисторів практично відповідають допустимим температурам тиристорних елементів.

Максимальний струм транзистора визначається в А:

$$I_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{розр} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{ф.ном}} \cdot \frac{\lambda}{\eta_{двиг} \cdot \cos\varphi}, \quad (2.36)$$

де λ - перевантажувальна здатність двигуна. $\lambda = 1,5$

$$I_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot 200 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} \cdot \frac{1,5}{0,956 \cdot 0,89} = 755,5 \text{ А.}$$

Визначаємо максимальну робочу напругу колектора в В:

$$U_{ке} = \sqrt{2} \cdot U_{л} \cdot K_c \cdot K_3, \quad (2.37)$$

де K_c – коефіцієнт допустимого підвищення напруги мережі. $K_c = 1,15$
 K_3 – коефіцієнт запасу. $K_3 = 1,2$

$$U_{ке} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,15 \cdot 1,2 = 714,6 \text{ В.}$$

Для реалізації схеми обрано IGBT-модулі транзисторного типу з такими параметрами:

- 1) постійний струм $I_H = 800 \text{ А}$;
- 2) допустима напруга $U_{ке.мах} = 1200 \text{ В}$;
- 3) загальний тепловий опір, що встановився, при стандартних умовах $R_T = 0,009^\circ\text{C}/\text{Вт}$;



- 4) час виключення $t_{\text{викл}}=2$ мкс;
- 5) максимально-допустима температура напівпровідникової структури $T_{\text{стр}}=125^{\circ}\text{C}$;
- 6) напруга насичення колектора при максимальному струмі $U_{\text{ке.sat}}=1,8$ В;
- 7) частота комутації $f_{\text{ком}} 1/T_{\text{ком}}=8 \cdot 10^{-3}$ Гц; $T_{\text{ком}}=125 \cdot 10^{-3}$ с ;
- 8) максимальна температура навколишнього середовища $T_{\text{нс.max}}=40$ °С.

По розрахунковим даним вибираємо частотний перетворювач.

Обираємо частотний перетворювач АВВ ACS580-04-585А-4 +Е210+Е208+J410+J400 - 315 кВт, 575А ІР21 (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Частотний перетворювач АВВ

2.3 Дослідження режимних параметрів роботи при частотному регулюванні

Для оцінки ефективності частотного регулювання насосного агрегату виконаємо розрахунок відносних значень подачі, напору та споживаної потужності при зміні частоти живлення електродвигуна в межах від 30 до 50 Гц табл 2.1. За базовий режим роботи приймається номінальний режим, для якого визначені такі параметри:

- частоту живлення $f_n = 50$ Гц;
- частоту обертання $n_n = 100\%$;
- подачу $Q_n = 100\%$;
- напір $H_n = 100\%$;
- потужність $P_n = 100\%$.

Таблиця 2.1- Аналіз зміни режимних параметрів насосного агрегату при частотному регулюванні

| Частота, Гц | Швидкість, | Подача | Напір H, % | Потужність |
|-------------|------------|--------|------------|------------|
|-------------|------------|--------|------------|------------|

| | % | Q, % | | P, % |
|----|-----|------|-----|------|
| 30 | 60 | 60 | 36 | 22 |
| 35 | 70 | 70 | 49 | 34 |
| 40 | 80 | 80 | 64 | 51 |
| 45 | 90 | 90 | 81 | 73 |
| 50 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Результати аналізу розрахункових даних яскраво демонструють, що навіть незначне зниження частоти напруги живлення статора електродвигуна приводить до експоненціального (кубічного) скорочення активної потужності, яку споживає насосний агрегат.

Зокрема, при зменшенні робочої частоти до рівня 40 Гц обсяг споживання електричної потужності падає майже вдвічі (складає близько 51,2% від вихідного номінального значення). Водночас об'ємна подача (продуктивність) насосної установки знижується в лінійній пропорції – лише на 20%, що повною мірою задовольняє вимоги технологічного регламенту мартенівського цеху в періоди зниженого водоспоживання.


Таке співвідношення параметрів підтверджує високу інженерну та економічну доцільність переходу від дросельного регулювання потоку рідини до частотно-керованого.

Забезпечення електромагнітної сумісності системи електропривода.

Проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) посідає одне з ключових місць при проектуванні та розгортанні автоматизованих електроприводів на базі напівпровідникових перетворювачів частоти. Актуальність цього питання суттєво зростає в умовах сучасних металургійних підприємств, які характеризуються розгалуженою структурою внутрішньозаводських електричних мереж та високою концентрацією прецизійного мікропроцесорного обладнання, засобів автоматики і телекомунікацій.

Статичні перетворювачі частоти за принципом своєї роботи виступають інтенсивними джерелами кондуктивних та індуктивних електромагнітних завад. Подібні деструктивні чинники зумовлені функціонуванням контурів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги та генерацією широкого спектра високочастотних гармонічних складових у струмах і напругах силових кіл. Поширення цих завад негативно позначається на функціонуванні суміжних пристроїв контролю, цифрових інтерфейсах зв'язку АСУ ТП, викликає паразитні струми витоку, а також ініціює додаткові теплові втрати в активних матеріалах електричних машин та кабельних провідниках. Відтак, під забезпеченням ЕМС у межах даного проекту розуміють впровадження комплексу заходів, спрямованих на локалізацію і зниження рівнів емісії завад до нормативно допустимих меж при одночасному підвищенні стійкості елементів СК до зовнішніх електромагнітних впливів.

Головними генераторами електромагнітних спотворень у топології частотно-регульованого привода є:

- 
- силові напівпровідникові ключі інвертора (IGBT-модулі) під час їх високочастотної комутації;
 - стрімкі динамічні процеси перемикання (du/dt та di/dt);
 - кабельні лінії зв'язку між вихідними клемми перетворювача та статором двигуна;
 - безпосередньо асинхронний електродвигун, який у заводових режимах розглядається як складне коло з розподіленими параметрами.

Сукупна дія зазначених факторів спричиняє спотворення синусоїдальної форми напруги живильної мережі, виникнення високочастотних випромінювань, протікання підшипникових струмів, струмів витоку на контур заземлення та появу небезпечних амплітудних перенапруг на витках ізоляції обмоток двигуна.

Для гарантування належного рівня ЕМС електропривода насосної станції високого тиску мартенівського цеху в проекті передбачено диференційовану систему технічних рішень:


- вхідні мережеві дроселі (лінійні реактори): інтегруються на вході перетворювача частоти для придушення гармонічних спотворень струму, обмеження швидкості наростання пускових струмів при ввімкненні, захисту напівпровідників від комутаційних сплесків напруги з боку мережі живлення та покращення загального коефіцієнта потужності системи ($\cos\phi$);

- вихідні фільтрувальні пристрої (du/dt та di/dt): встановлюються на виході інвертора. Вони обмежують крутизну фронту імпульсів напруги, нівелюють хвильові перенапруги в довгих кабельних лініях і на вхідних витках статора, запобігаючи передчасному пробою та деградації ізоляційних матеріалів електричної машини;

- екранування силових кабельних трас: силова лінія «перетворювач – двигун» виконується за допомогою спеціалізованого екранованого кабелю. Це дозволяє заблокувати випромінювання високочастотного електромагнітного поля у навколишній простір і запобігти паразитним наведенням у сусідніх слабкострумівих колах. Для ефективного відведення заводових струмів мідний екран кабелю підлягає обов'язковому двосторонньому заземленню (як у шафі перетворювача, так і на корпусі двигуна) із забезпеченням кругового (360°) контакту за допомогою електромагнітних затискачів;

- раціональна організація захисного заземлення: передбачає створення радіальної структури («зірка») з приєднанням усіх металевих корпусів до єдиної магістралі заземлення. При цьому мінімізується довжина заземлювальних шин та повністю виключається утворення замкнених земляних контурів (петель), які можуть функціонувати як антени для наведених заводів;

- просторове рознесення та ЕМІ-фільтрація: силові кабелі та інформаційні сигнальні лінії керування прокладаються в ізольованих металевих лотках або кабельних каналах із дотриманням регламентованої просторової дистанції. У разі їх перетину кут повинен



становити строго 90°. На додачу, вхідні кола перетворювача оснащуються мережевими фільтрами електромагнітних завад (ЕМІ-фільтрами) для придушення радіозавад у високочастотному спектрі.

Паралельно із послабленням джерел випромінювання завад реалізується комплекс заходів щодо підвищення завадостійкості безпосередньо контурів керування. Дана задача вирішується шляхом застосування промислових логічних контролерів (ПЛК) у захищеному виконанні, переходу на уніфіковані аналогові сигнали струмової петлі (диференційні канали 4–20 мА замість потенційних), апаратної та програмної фільтрації даних від технологічних датчиків, використання витої пари з екраном для інтерфейсних зв'язків та обов'язкового розгортання оптичної або магнітної гальванічної розв'язки між інформаційними та силовими модулями системи.

Проектування електропривода виконано у суворій відповідності до вимог вітчизняних та міжнародних стандартів у сфері ЕМС, що гарантує безаварійну, стабільну та тривалу експлуатацію всього інженерного комплексу насосної станції в жорстких умовах промислового середовища металургійного підприємства.

Аналіз механічних характеристик насосних агрегатів систем водопостачання

Паспортні та експлуатаційні параметри гідросилового обладнання, розгорнутого на насосній станції мартенівського цеху, зведені та систематизовані в табл. 2.1. Проте для визначення дійсних режимних показників роботи відцентрового насосного агрегату недостатньо керуватися лише його індивідуальними параметрами - необхідним є комплексний аналіз сумісного функціонування нагнітальної установки та гідравлічної мережі, на яку вона працює.

Графічна залежність напору від продуктивності (характеристика мережі) $H = f(Q)$ визначає величину загального напору, яку повинен згенерувати насосний агрегат у вхідному перерізі трубопроводу для транспортування заданого об'єму рідкого середовища до кінцевого споживача. Цей сумарний напір є аддитивною величиною і формується з двох базових компонентів:

- статичний напір ($H_{ст}$): постійна складова, що визначається геометричною висотою підйому рідини в системі (різницею відміток рівнів між приймальним та роздавальним резервуарами), а також різницею надлишкових тисків у цих ємностях;

- динамічний напір ($H_{д}$): змінна складова, яка витрачається на подолання комплексного гідродинамічного опору в елементах мережі, що виникає внаслідок в'язкого тертя шарів рідини об внутрішні стінки трубопроводів, а також у вузлах місцевих опорів (запірно-регулююча арматура, повороти, звуження, трійники).

Таким чином, узагальнена функціональна характеристика гідравлічної мережі дозволяє чітко квантифікувати параметри енергії, яку має передати насос потоку рідини для забезпечення заданого

технологічного дебіту з урахуванням конфігурації трубопровідної системи та висоти підйому.

Координати точки перетину індивідуальної графічної характеристики відцентрового насоса (крива 1) та кривої гідравлічного опору мережі (крива 2) визначають так звану робочу точку системи (рис. 2.5). Ця графічна інтермінація фіксує фактичний режим роботи насосного агрегату - поточні значення напору та об'ємної подачі, за яких досягається динамічний баланс між енергією насоса та опором магістралі [18].

$$H = H_{cm} + RQ^2, \quad (2.38)$$

де R – коефіцієнт опору мережі.

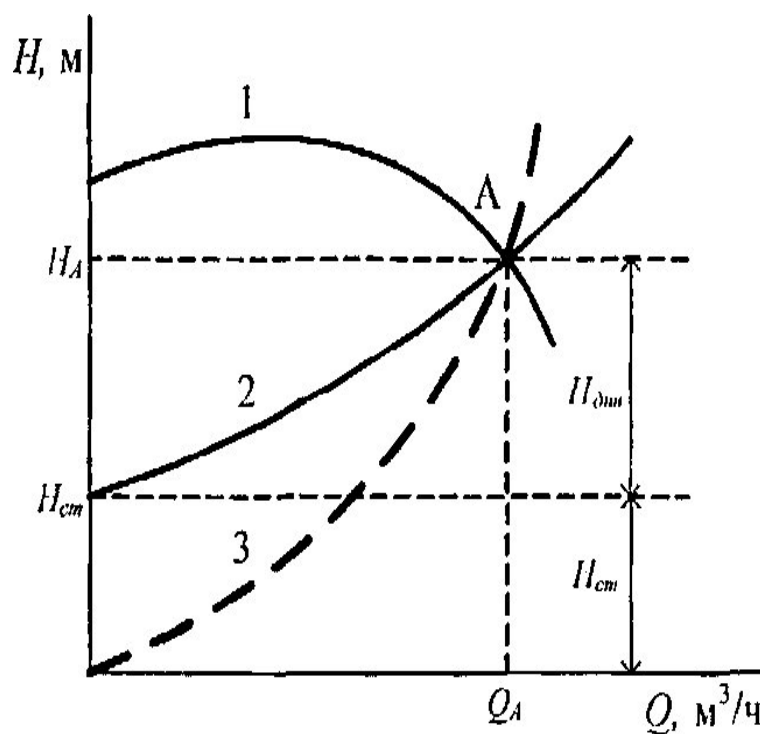


Рисунок 2.5 – Робочі параметри насоса в системі: 1 – характеристика насоса; 2 – характеристика мережі при наявності протитиску; 3 – характеристика мережі без протитиску

Рис. 2.5 ілюструє взаємозв'язок між характеристиками насоса та мережі, демонструючи зміну робочого режиму насосного агрегату залежно від умов експлуатації, зокрема від величини протитиску в системі.

Дослідження методів регулювання продуктивності та частотного керування.

Продуктивність насоса може регулюватися шляхом зміни швидкості обертання його робочого колеса. При зменшенні швидкості для коригування подачі характеристики насоса зміщуються вниз, тоді як характеристика мережі залишається незмінною. Для визначення

параметрів роботи насосного агрегату при різних швидкостях обертання використовуються формули приведення, подані у відносних одиницях.

$$Q^* = Q_i^* \left(\frac{n_H}{n_i} \right); H^* = H_i^* \left(\frac{n_H}{n_i} \right)^2; P^* = P_i^* \left(\frac{n_H}{n_i} \right)^3; \quad (2.39)$$

Наявність статичної складової в загальному гідравлічному опорі системи накладає жорсткі фізичні обмеження на глибину частотного регулювання відцентрових машин. При частотному керуванні продуктивністю насосного агрегату зниження кутової швидкості обертання вала є доцільним лише до певної критичної межі, за якої розвивальний напір на вихідному патрубку стає рівним статичному напору магістралі ($H=H_{ст}$). У цій граничній точці об'ємна подача рідини в мережу повністю припиняється ($Q=0$), а подальше зменшення частоти струму статора переводить електричну машину в неефективний режим роботи, де енергія витрачається виключно на внутрішнє тертя рідини в корпусі без її транспортування.

З аналізу сімейства результуючих робочих характеристик чітко видно, що мінімальна межа діапазону частотного регулювання повністю детермінується величиною протитиску системи. Зокрема, при зниженні частоти обертання ротора до значення n_4 (рис. 2.6) генерований напір насоса виявляється меншим за статичний тиск у напірному колекторі. Це призводить до закриття зворотного клапана гідравлічної системи, ізоляції насоса від мережі та виникнення режиму роботи на закриту засувку.

Таким чином, вагоме значення статичного напору в металургійних контурах охолодження обмежує ефективний діапазон зміни частоти та накладає ліміт на потенціал енергозбереження. Проте в межах допустимого технологічного коридору (вище критичної точки) варіація кутової швидкості робочого колеса залишається найбільш дієвим інструментом для прецизійної корекції дебіту, мінімізації втрат активної потужності та оптимізації роботи всього гідротехнічного комплексу.

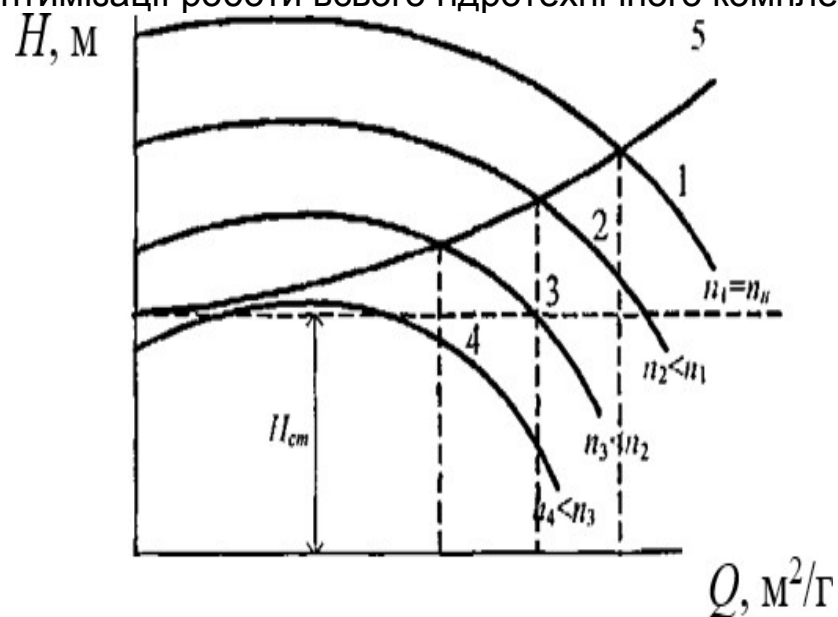




Рисунок 2.6 - Регулювання продуктивності шляхом зміни швидкості обертання робочого колеса: 1, 2, 3, 4 – характеристики насоса; 5 – характеристика мережі при наявності протитиску

Граничним експлуатаційним режимом для відцентрових насосних агрегатів є функціонування з максимальною продуктивністю при граничній кутовій швидкості та номінальних параметрах напруги живлення на обмотках статора. У такому стані діюче значення струму статора та сумарні теплові й магнітні втрати в електричній машині не повинні виходити за межі панорами критичних значень, регламентованих паспортними даними заводу-виробника.

Задля гарантування статичної і динамічної стабільності електродвигуна, запобігання його токовим перевантаженням, виключення режимів насичення магнітопроводу та підтримання оптимального коефіцієнта корисної дії, статичний перетворювач частоти має реалізувати чітку функціональну залежність між амплітудою та частотою вихідної напруги. Ця пропорція безпосередньо детермінується профілем механічної характеристики підключеного гідравлічного навантаження і закладається в систему керування інвертора у вигляді базового закону частотного регулювання (закону Костенка).

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (2.40)$$

Якщо механічна характеристика гідродинамічного обладнання описується рівнянням квадратної параболи (через відсутність протитиску в системі), то для коректного керування процесом слід спиратися на математичний зв'язок між обертами вала та поточною витратою рідини.

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_2}{f_2^2} = const \quad (2.41)$$

Для систем із протитиском (статичним напором) математична модель робочих процесів передбачає введення показника степеня k у рівняння характеристики. Це необхідно для точного відображення впливу статичного тиску на роботу обладнання та оптимізації співвідношення його параметрів під час динамічної зміни обертів двигуна.

$$\frac{U_1}{f_1^{1+\frac{k}{2}}} = \frac{U_2}{f_2^{1+\frac{k}{2}}} \quad (2.42)$$

Для гнучкого керування параметрами насосних станцій зазвичай інтегрують промислові ПЧ. Ця технологія дозволяє суттєво заощаджувати

енергоресурси, зберігаючи експлуатаційну надійність і задані режими роботи обладнання навіть за нестабільного технологічного графіка.

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = const, \quad (2.43)$$

Зважаючи на це, формулу моменту асинхронного двигуна для частотно-регульованого привода, яка комплексно враховує як відносну частоту напруги живлення, так і індуктивний опір кола намагнічування, запишемо так:

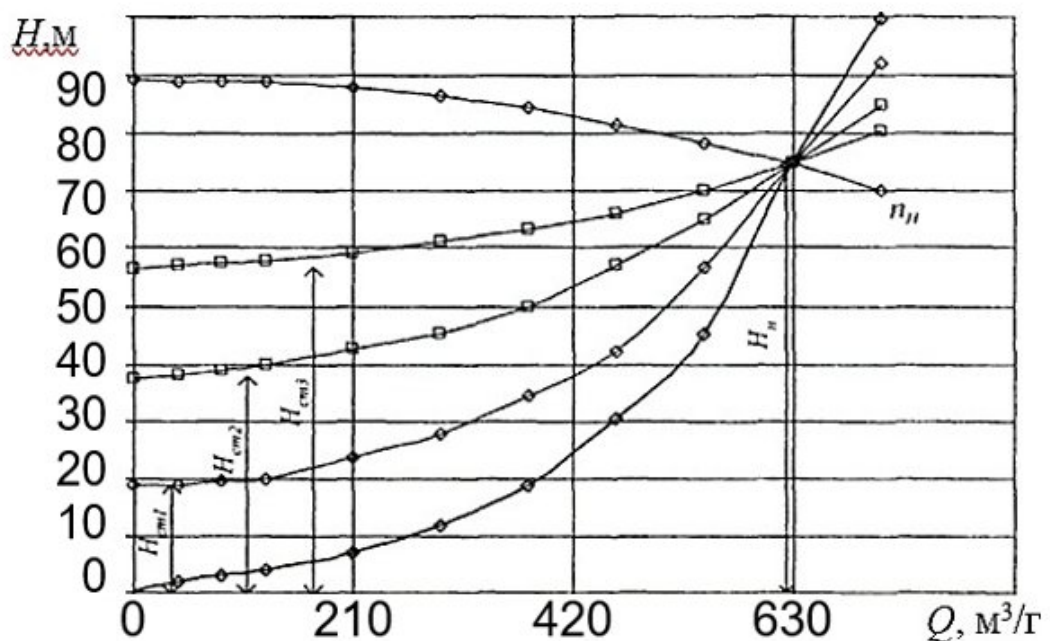
$$M_{дв} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot f_1^{*2} \cdot \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_1^*} \right)^2 \right]}, \quad (2.44)$$

де $X_{\mu n}$ – індуктивний опір контуру намагнічування;

$f_1^* = f_1 / f_{1n}$ – відносне значення частоти напруги живлення.

Для ідентифікації положення робочої точки системи при регулюванні швидкості першочергово використовують механічну характеристику насоса (на прикладі агрегату WILLO SCP 200/460HA). На рис. 2.7 продемонстровано суміщені графіки напору H , витрати Q та потужності P_n , отримані для номінальної швидкості електродвигуна $n_n = 1470$ об/хв.

Завдяки цим залежностям стає можливим аналіз ефективності насосного процесу при флуктуаціях параметрів системи. Це дозволяє коректно координувати роботу обладнання та гнучко вибирати координати робочої точки під конкретні технологічні завдання.






Рисунок. 2.7 – Графік роботи насосного агрегату WILO SCP 200/460HA та трубопроводу

Механічні характеристики насоса.

З погляду теорії електропривода, насосні агрегати класифікуються як навантажувальні механізми, чий режим роботи описується залежністю електромагнітного моменту опору від частоти обертання ротора ($M_c = f(n)$).

Гідравлічні властивості мережі, зумовлені балансом динамічного та статичного тисків, безпосередньо трансформують вигляд цієї характеристики. Отримання механічної кривої базується на суміщеному аналізі напірно-витратних показників системи та насоса в режимах регулювання кутової швидкості асинхронної машини. Зміна статичної компоненти ($H_{ст}$) призводить до деформації профілю характеристики, а розрахунок результуючого моменту опору здійснюється за допомогою спеціалізованої математичної моделі, що інтегрує ключові параметри системи.

$$M_c = 9,565 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_H \cdot n}, \quad (2.45)$$

де ρ – щільність рідини, що перекачується, в нашому випадку води;

g – прискорення вільного падіння;

η_H – ККД насосного агрегату.

Для трубопровідних систем із незмінними характеристиками визначальним фактором є втрати напору, викликані в'язкісним тертям у потоці, шорсткістю стінок каналу та подоланням місцевих гідравлічних опорів. Дані втрати змінюються пропорційно квадрату витрати рідини чи швидкості її руху. На результуючий опір контуру впливають такі геометричні та фізичні параметри, як довжина й переріз магістралі, в'язкість транспортуємого середовища, стан внутрішніх поверхонь труб і наявність фасонних елементів чи запірних пристроїв.

Вихідні напірно-витратні показники насоса, що відповідають номінальним обертам двигуна, трансформуються для будь-якої проміжної частоти обертання за допомогою формул подібності. Це забезпечує можливість побудови механічних характеристик обладнання при варіації швидкості, які набувають наступного вигляду:

$$H = H_0 \left(\frac{n}{n_H} \right)^2 + Q^2 \frac{H_0 \cdot H_H}{Q_H^2}, \quad (2.46)$$

де n_H – це частота обертання механізму, яка є номінальною;

H_0 – статичний напір, що створюється при номінальній частоті обертання, коли витрата рідини дорівнює нулю;

H_H – напір насоса при номінальній роботі;

Q_H – номінальна продуктивність насоса.

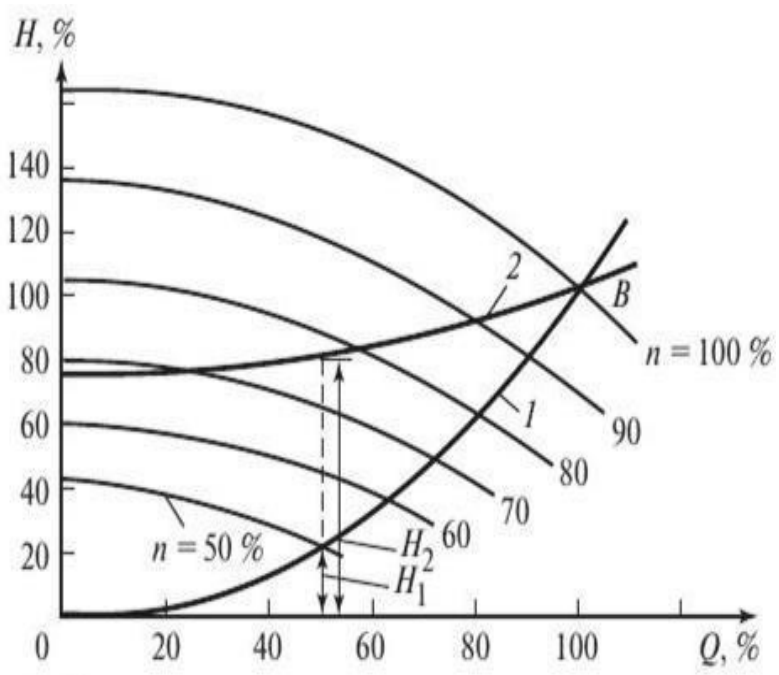


Рисунок 2.8 – Характеристики насосного агрегату WILCO SCP 200/460HA та трубопроводу при зміні частоти обертання

Узагальнена аналітична модель для визначення моменту опору насоса описується такою математичною залежністю: Графічний матеріал, ілюстрований на рисунку 2.8, відображає трансформацію характеристик насосного агрегату в режимах частотного регулювання спільно з кривою опору трубопроводу при статичній компоненті напору $H_{ст2} = 0,5H_n$. Спільні точки перетину цих ліній ідентифікують режими функціонування (робочі точки) обладнання.

$$M_c = 9,565 \cdot \frac{P_n}{n}, \quad (2.47)$$

Аналітичне визначення моменту опору насосного комплексу реалізується за допомогою математичної моделі (2.42), яка пов'язує цей параметр із продуктивністю або швидкістю обертання ротора. Наявність статичної складової напору (протитисяку) в системі зумовлює те, що функція моменту від обертів двигуна має більш круту траєкторію, ніж стандартна квадратична парабола. Тобто, у разі збільшення частоти обертання опір обладнання зростає прогресивніше порівняно зі спрощеними степеневими моделями.

Сімейство кривих, що наочно демонструють трансформацію моменту опору за різних режимів роботи насосної установки, представлено у формі діаграми на рис. 2.9.

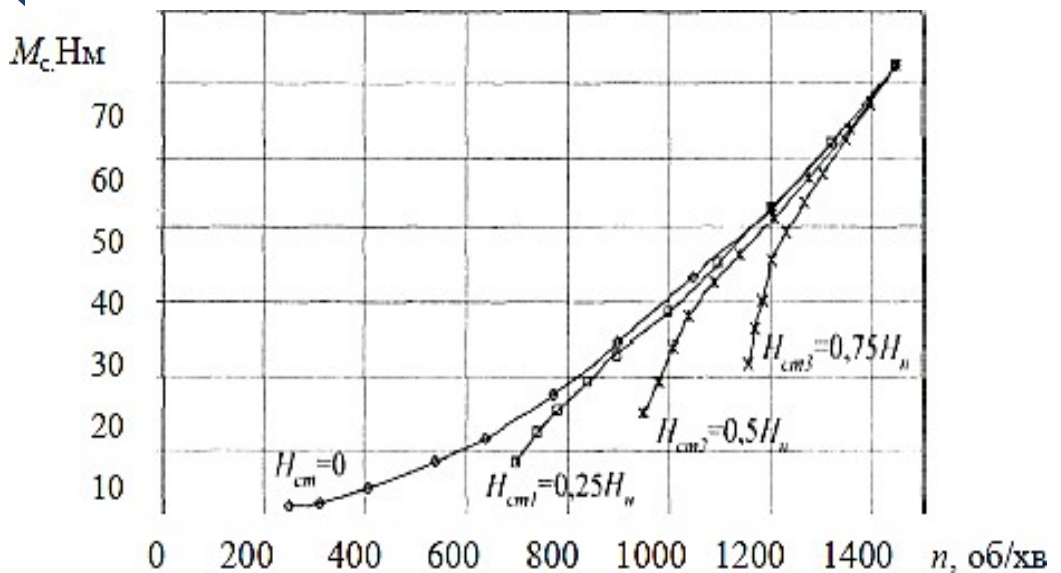


Рисунок 2.9 – Механічні характеристики насосного агрегату WILO SCP 200/460HA при різних значеннях статичної складової напору

При розгоні вала від нуля до початкової робочої швидкості момент опору підпорядковується параболічному закону. Як тільки створюваний насосом тиск зрівнюється зі статичним напором мережі, характер зв'язку між цими параметрами переформатовується, відображаючи вплив статичної складової. Завдяки методам апроксимації на основі цієї залежності будується математичний опис робочих процесів агрегату. Як ілюструє рисунок 2.9, навантажувальні криві перебувають у прямій залежності як від початкового статичного тиску, так і від конфігурації самого трубопроводу, що робить підсумкову характеристику комплексною. Проте в режимах автоматичного керування із забезпеченням незмінного напору ($H = H_n = \text{const}$) в точці контролю, механічні показники насоса відхиляються від раніше розглянутих закономірностей. На рис. 2.10 наведено графік моменту опору нагнітального обладнання, що діє на вал асинхронної машини, в умовах підтримання постійного тиску ($H = H_n = \text{const}$) для гідравлічного контуру з параметром $H_{ст2} = 0,5H_n$

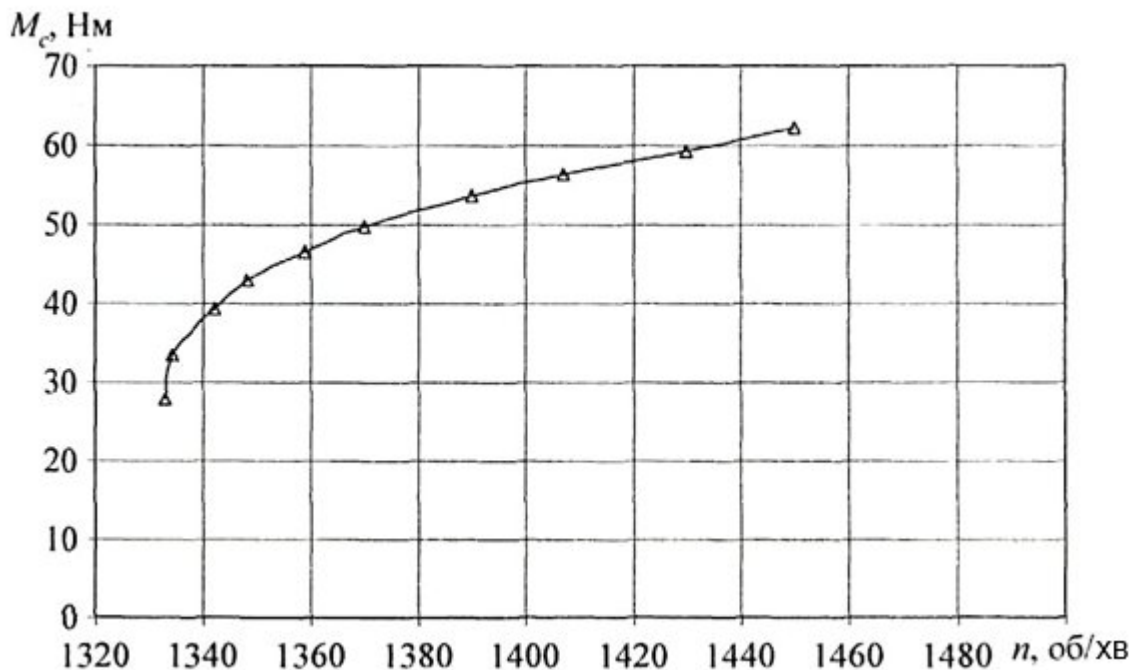


Рисунок 2.10 – Механічна характеристика насосної установки

Як показує аналіз графіків, вищий статичний напір стискає межі можливого регулювання параметрів насоса. При цьому під час зниження обертів кутова характеристика моменту спадає стрімкіше за квадратичну параболу (див. рисунок 2.10). Отже, для точного моделювання робочих режимів обмаль використовувати лише аналітичні формули — необхідно спиратися на реальний технологічний контекст роботи обладнання. Навантажувальна крива агрегату при забезпеченні стабільного тиску в контурі ($H=H_n = \text{const}$) має вищий порядок складності, ніж звичайна квадратична функція, та повністю інтегрує в себе чинник величини цього постійного напору.

2.4 Алгоритм та організація експериментальних досліджень

Мета проведення експерименту – кількісна та якісна оцінка результатів застосування ПЧ для гнучкого керування нагнітальними комплексами високого тиску з метою оптимізації енергетичного балансу та підтримання заданого технологічного режиму при варіації витрати рідини.

Програма досліджень передбачає комплексний моніторинг впливу частотного регулювання на обсяги споживання активної потужності, аналіз динаміки зміни тиску в магістралі та частоти обертання електродвигуна, що дозволить встановити математичну залежність між швидкісними режимами вала та загальним ККД насосної станції.

Для реалізації експериментальної частини задіяно таку апаратно-програмну конфігурацію:

- силовий частотний регулятор;

- манометричні датчики зворотного зв'язку, що контролюють рівень тиску в трубопровідній мережі;
- енкодер або безконтактний датчик обертів для детектування швидкості асинхронного двигуна;
- датчики струму та напруги в колі живлення статора для оцінки зсуву фаз і споживаної потужності;
- програмний софт для візуалізації, побудови трендів та архівації виміряних величин.

Реалізація зворотного зв'язку за кутовою швидкістю ротора АД за допомогою цифрового давача обертів.

Зважаючи на специфіку архітектури досліджуваної насосної установки з високовольтними приводами, раціональним інженерним рішенням є інтеграція оптичного датчика кутового переміщення серії Kooyo TRD-S (рис. 2.11). Інтегральні технічні параметри та експлуатаційні властивості цього вимірювального пристрою систематизовано в табл. 2.2.



Рисунок 2.11 – Інкрементальний енкодер Kooyo TRD-S Series для вимірювання частоти обертання

Модифікація Kooyo TRD-S Series характеризується підвищеною точністю детектування кутової швидкості, що дозволяє організувати замкнену і високочутливу систему автоматичного керування частотно-регульованим приводом табл. 2.2. Конструктивне виконання інкрементальних енкодерів цієї марки орієнтоване на суворі умови експлуатації, притаманні насосним станціям високого тиску. Показники захищеності корпусу та загальна апаратна надійність пристрою мінімізують ризик відмов, забезпечуючи безперебійний моніторинг параметрів обладнання в реальному часі.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики інкрементального енкодера Kooyo TRD-S Series

| | | |
|-------------|-----------|------------|
| Максимальна | швидкість | 6000 об/хв |
|-------------|-----------|------------|

| | |
|---------------------|------------------------------------|
| обертання | |
| Роздільна здатність | Від 100 до 5000 імпульсів на оберт |
| Напруга живлення | 5-24 В |
| Робоча температура | -10 °С до +70 °С |
| Захист | IP 54 |

Для забезпечення прецизійного контролю частоти обертання таходатчик жорстко сполучають із валом приводного електродвигуна або насоса. Імпульсні виходи енкодера (фази А, В та індексна мітка Z) комутуються з платою розширення перетворювача частоти. На основі цих сигналів автоматика обчислює швидкісні показники привода й здійснює динамічне коригування його робочого режиму. Практичне впровадження сенсора Kooyo TRD-S Series передбачає обов'язкове проведення його юстування (калібрування) для досягнення паспортної точності, а також програмне налаштування інтерфейсу зчитування даних. Структурне компонування системи контролю з використанням датчика Kooyo TRD-S відображено на рис. 2.12.

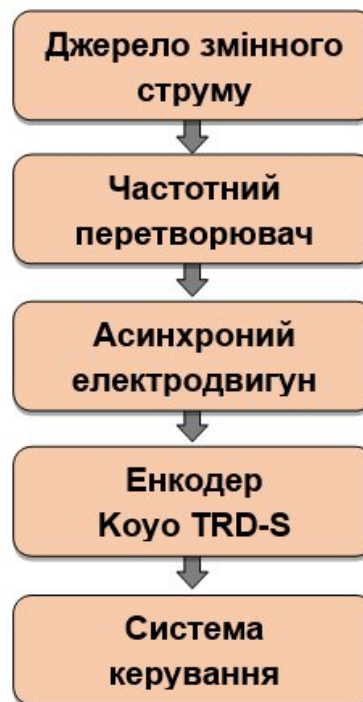


Рисунок 2.12 – Схема системи з використанням частотного перетворювача та енкодера Kooyo TRD-S

Застосування датчика тиску в насосній станції мартенівського цеху. Для контролю гідравлічних параметрів у проекті використано промисловий датчик надлишкового тиску серії Сафір М 5151 (зовнішній

вигляд проілюстровано на рисунку 2.13). Пристрій орієнтований на роботу в контурах вимірювання тиску технологічних рідин і газів.

Завдяки високим метрологічним характеристикам, довговічності та завадостійкості, сенсор Сафір М 5151 є оптимальним інженерним рішенням для комплектації цієї насосної установки. Зведені технічні дані та робочі діапазони приладу систематизовано далі в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики датчика тиску Сафір М 5151

| | |
|------------------------|-----------------------------------|
| Діапазон вимірювання | від 0 до 16 МПа |
| Тип вихідного сигналу | аналоговий (4 - 20 мА, 0 - 10В) |
| Живлення | 12-36 В постійного струму |
| Температурний діапазон | від -40°C до +85°C |
| Точність | ±0.25% від повного діапазону |
| Захист | IP65 або вище, залежно від моделі |



Рисунок 2.13 – Датчика тиску Сафір М 5151

Монтаж вимірювального перетворювача здійснюється на ділянці трубопроводу або колектора, де вимагається безперервний контроль тиску. При виборі точки інсталяції пріоритет надається зонам із мінімальним рівнем вібраційних навантажень та температурними режимами, що не виходять за граничні експлуатаційні межі приладу. Для досягнення повної герметичності стикувального вузла застосовують спеціалізовану сполучну арматуру (фітинги) та ущільнювальні матеріали.

Електрична комутація датчика з джерелом живлення та периферійними пристроями автоматизації реалізується у строгій відповідності до принципів схем заводу-виробника. Дана процедура передбачає підключення аналогових або цифрових вихідних каналів до відповідних вхідних модулів промислового контролера чи частотного регулятора (рис.2.14). Інтеграція обладнання завершується етапом первинного метрологічного налагодження, що включає коригування зміщення нуля та масштабування шкали для забезпечення паспортної точності вимірювань.



Рисунок 2.14 – Схема системи з використанням частотного перетворювача та датчика тиску Сафір М 5151

Функцію енергозабезпечення всього комплексу обладнання, зокрема частотного регулятора, асинхронного електродвигуна та манометричного сенсора, виконує спільне джерело живлення. Перетворювач частоти здійснює модуляцію параметрів напруги та частоти, що надходять на статорні обмотки асинхронної машини, забезпечуючи тим самим гнучке керування кутовою швидкістю насоса.

Безперервний моніторинг напірних показників у гідросистемі реалізується за допомогою датчика типу «Сафір М 5151», який трансформує виміряний тиск у контрольний сигнал і транслює його до керуючого модуля. На основі отриманої від датчика інформації зворотного зв'язку, автоматика оптимізує керуючі алгоритми ПЧ задля стабілізації заданого технологічного режиму роботи насосної станції.

Схемотехнічне рішення щодо реновації пускових комплексів електродвигунів на насосній станції високого тиску.

Принципова схема модернізації пускового комплексу електродвигунів для високонапірної насосної установки наведена на рисунку 2.15. Запропонована структура базується на інтеграції перетворювача частоти (ПЧ), а також контурів зворотного зв'язку із застосуванням вимірювальних датчиків тиску в магістралі та кутової швидкості вала.

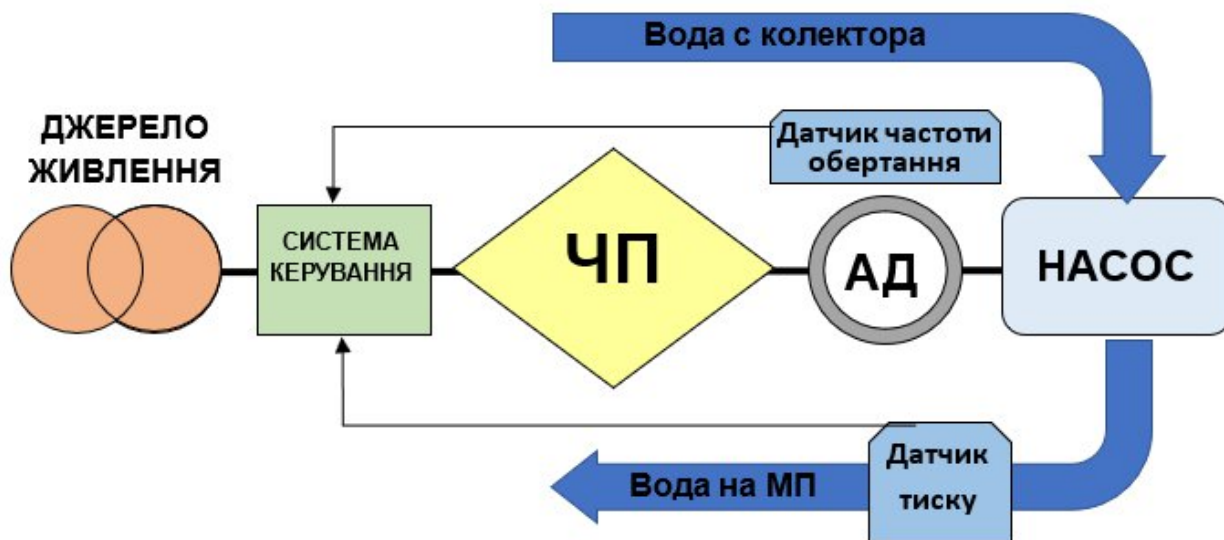



Рисунок 2.15 – Схемотехнічна реалізація модернізованої системи запуску приводних двигунів насосної станції із впровадженням ПЧ

Після завершення монтажу статичного перетворювача частоти, первинних вимірювальних перетворювачів тиску та таходатчика кутової швидкості, здійснюється етап пусконаладжувальних робіт. Він включає калібрування каналів датчиків та параметрування макросів системи автоматичного керування (САК) відповідно до заданих технологічних умов мартенівського виробництва.

Програма проведення інженерного експерименту реалізується за таким покроковим алгоритмом:

1. Комутація живлення – процес активізації дослідного стенда розпочинається із подачі напруги від блока живлення на логічні та сигнальні контури САК. Цей модуль є базовим інтегральним елементом апаратної частини, оскільки гарантує стабільний енергетичний потенціал для мікропроцесорного ядра, контролерів та інтерфейсних плат, які здійснюють координацію та інформаційний обмін між усіма компонентами системи.

2. Формування керуючих сигналів – обробивши вихідні уставки, САК генерує та транслює керуючі директиви (імпульси) на силові транзисторні інвертори перетворювача частоти. ПЧ, реалізуючи закладений закон керування, здійснює динамічну зміну амплітуди та частоти вихідної



напруги живлення статора асинхронного електродвигуна. Це дозволяє гнучко варіювати кутову швидкість ротора, адаптуючи її до миттєвої гідравлічної потреби.

3. Забезпечення технологічного процесу – робоче середовище (охолоджувальна вода) із приймального колектора надходить до проточної частини відцентрового насоса, який здійснює її транспортування під заданим тиском до теплообмінних контурів, вузлів та конструктивних елементів мартенівських печей з метою захисту сталеплавильних агрегатів від термічного руйнування.

Контур зворотного зв'язку та реєстрація параметрів

Для реалізації замкненого контуру автоматичного регулювання у реальному часі задіяні канали зворотного зв'язку:

- на вихідному напірному патрубку насосного агрегату розгорнуто датчик тиску, який безперервно фіксує поточний гідродинамічний напір у магістралі;

- на валу асинхронного двигуна інтегровано давач частоти обертання, що передає імпульсний або аналоговий сигнал поточної швидкості до контролера САК.


Отриманий інформаційний масив миттєво обробляється мікропроцесорним пристроєм за заданим алгоритмом (наприклад, ПІД-регулятором). На основі розрахованої неузгодженості між детектувальними та еталонними значеннями система вносить операційні корективи у роботу ШІМ-інвертора частотного перетворювача. Таке архітектурне рішення стабілізує вихідні параметри гідросистеми та нівелює коливання тиску при змінних режимах водоспоживання.

Під час проведення серії дослідів здійснюється безперервний дискретний моніторинг та реєстрація ключових параметрів системи: кутової швидкості електричної машини, амплітуди струму статора та результуючого тиску рідини. Накопичені тренди та осцилограми виступають основою для подальшого теоретичного та техніко-економічного аналізу:

- масив даних таходатчика – дозволяє детально оцінити динамічні властивості, точність та якість відпрацювання перетворювачем частоти заданих режимів швидкості, а також зафіксувати наявність та величину статичної похибки чи відхилень від розрахункових тахограм;

- показники датчика тиску – надають вичерпну інформацію про гідравлічний стан мережі при фіксованих частотах живильного струму. Аналіз цих епюр дає змогу верифікувати показники стабільності гідродинамічного напору та підтвердити експлуатаційну надійність обладнання.

Сформована комплексна методика інженерного експерименту забезпечує всебічний і глибокий аналіз енергетичних та гідравлічних координат модернізованого електропривода. Отримані результати підтверджують, що перехід на частотно-регульований режим пуску та роботи високовольтних насосів забезпечує демпфування динамічних



ударів, знижує пускові струми, мінімізує механічний знос кінематичних пар і запірної арматури, генеруючи суттєвий ефект енергозбереження.

2.5 Моделювання системи ЧПД для насосів

Моделювання системи частотно-перетворюваного електропривода (ЧПД) насосного агрегату є важливим етапом проєктування та модернізації насосних станцій. Воно дозволяє дослідити режими роботи електропривода, оцінити ефективність частотного регулювання та визначити основні параметри системи без проведення дорогих експериментальних випробувань на реальному обладнанні.

Об'єктом моделювання є система, що складається з частотного перетворювача, асинхронного електродвигуна та насосного агрегату. Основною функцією системи є автоматичне регулювання швидкості обертання електродвигуна залежно від технологічних потреб, що забезпечує підтримання необхідного тиску або витрати води в системі.

Під час моделювання приймається, що частотний перетворювач забезпечує плавну зміну частоти та напруги живлення електродвигуна за законом $U/f = \text{const}$. Такий принцип керування дозволяє підтримувати магнітний потік двигуна на оптимальному рівні та забезпечувати його стабільну роботу в широкому діапазоні швидкостей.

Математична модель насосного агрегату базується на законах подібності насосів. Відповідно до цих законів продуктивність насоса прямо пропорційна частоті обертання робочого колеса, напір пропорційний квадрату частоти обертання, а споживана потужність – кубу частоти обертання. Завдяки цьому навіть незначне зменшення швидкості обертання дозволяє суттєво скоротити енергоспоживання насосного агрегату.

У процесі моделювання досліджуються перехідні та усталені режими роботи системи. Особлива увага приділяється процесам пуску електродвигуна. На відміну від прямого пуску від мережі, використання частотного перетворювача забезпечує плавний розгін двигуна без значних пускових струмів і механічних ударів у насосному обладнанні. Це позитивно впливає на надійність роботи системи та збільшує ресурс обладнання.

Результати моделювання показують, що застосування частотного регулювання дозволяє підтримувати необхідні параметри роботи насосної станції при мінімальних витратах електроенергії. Система автоматично адаптує швидкість обертання двигуна до змін навантаження, забезпечуючи стабільний тиск у трубопроводі та ефективно використання електричної енергії.

Таким чином, результати моделювання системи ЧПД рис.2.16- 2.54 підтверджує доцільність використання частотного перетворювача для керування насосними агрегатами. Отримані результати свідчать про можливість підвищення енергоефективності насосної станції, зниження

експлуатаційних витрат та покращення надійності роботи технологічного обладнання.

Таблиця 2.3 – Основні параметри асинхронного двигуна

| Характеристика електродвигуна | AIP355S4 |
|---|-----------------------------------|
| Потужність | 250 кВт |
| Частота обертання магнітного поля статора | 1500 об/хв |
| Частота обертання вала | 1490 об/хв |
| Тип двигуна | Асинхронний |
| Напруга живлення | Трифазна, 380/660 В |
| Монтажне виконання | На лапах / фланцеве / комбіноване |
| Номінальний струм | 360 А |
| ККД | 95,2 % |
| Номінальний обертальний момент | 1604,503 Н·м |
| Відношення пускового моменту до номінального ($M_{п} / M_{н}$) | 2,1 |
| Відношення максимального моменту до номінального ($M_{\max} / M_{н}$) | 2,2 |
| Відношення пускового струму до номінального ($I_{п} / I_{н}$) | 6,9 |
| Момент інерції | 6,5 кг·м ² |
| Діаметр вала | 100 мм |
| Маса | 1700 кг |
| Передній / задній підшипник | 6322 ZZ-C3 / 6322 ZZ-C3 |
| Рівень шуму | до 101 дБ |

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{н} = \frac{2\pi n_{н}}{60} \quad (2.48)$$

$$\omega_{н} = \frac{2\pi \cdot 1490}{60} = 156,03 \text{ рад/с}$$


Скалярний закон керування

Для пуску приймається закон:

$$\frac{U}{f} = \text{const} \quad (2.49)$$

тобто:

$$U_1(t) = U_{н} \frac{f(t)}{f_{н}} \quad (2.50)$$



Момент навантаження насоса
Для насоса:

$$M_c(t) = M_H \left(\frac{\omega(t)}{\omega_H} \right)^2 \quad (2.51)$$

При $\omega = 0$

$$M_c = 0$$

При $\omega = \omega_H$

$$M_c = M_H$$

Рівняння руху електропривода.
Основне рівняння механічної частини:

$$J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c \quad (2.52)$$

де J_Σ – сумарний момент інерції двигуна і механізму.
Момент інерції насоса моделювання прийняти:

$$J_\Sigma = 2,0 \cdot J$$

Чисельне моделювання перехідних процесів пуску насосного агрегату з двигуном AIP355S4 250 кВт при скалярному керуванні ($U/f = \text{const}$).

Прийнято:

$$U_H = 380 \text{ В}, \quad f_H = 50 \text{ Гц}, \quad t_p = 10 \text{ с}, \quad M_c = M_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2, \quad J_\Sigma = 13 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Графіки зміни частот, напруги, навантаження та інші зображено на рис. 2.16-2.54.

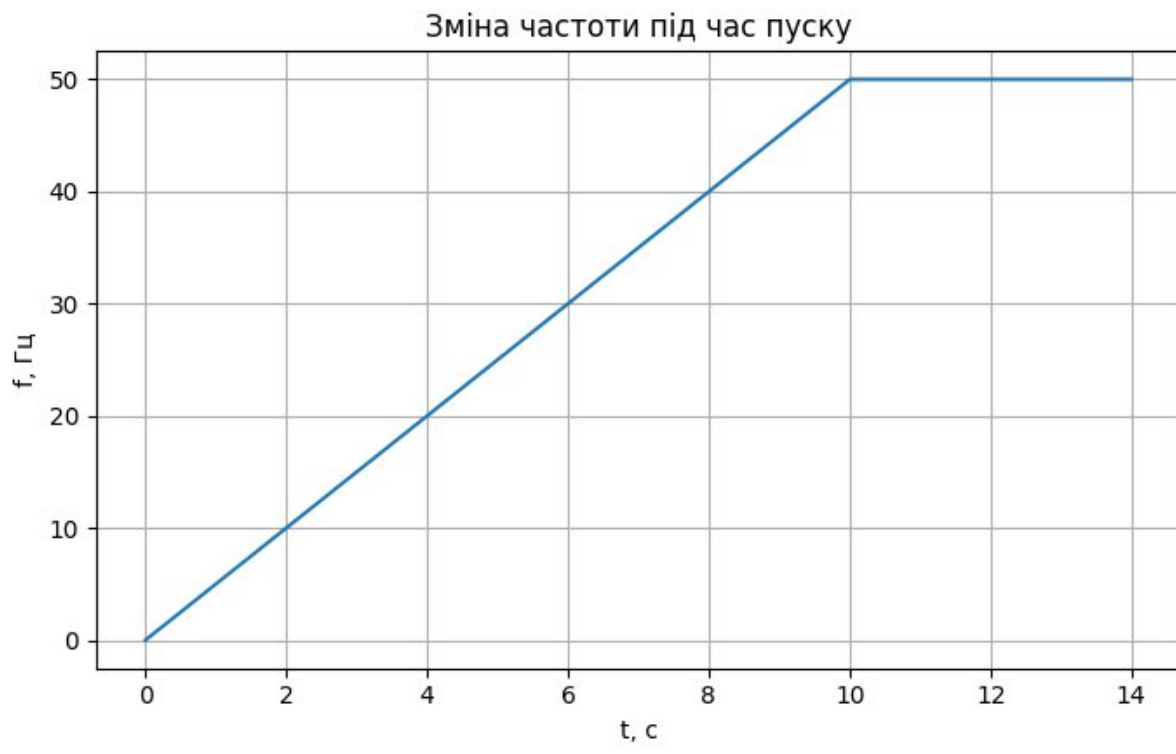


Рисунок 2.16 – Зміна частоти під час пуску



Рисунок 2.17 – Закон зміни напруги

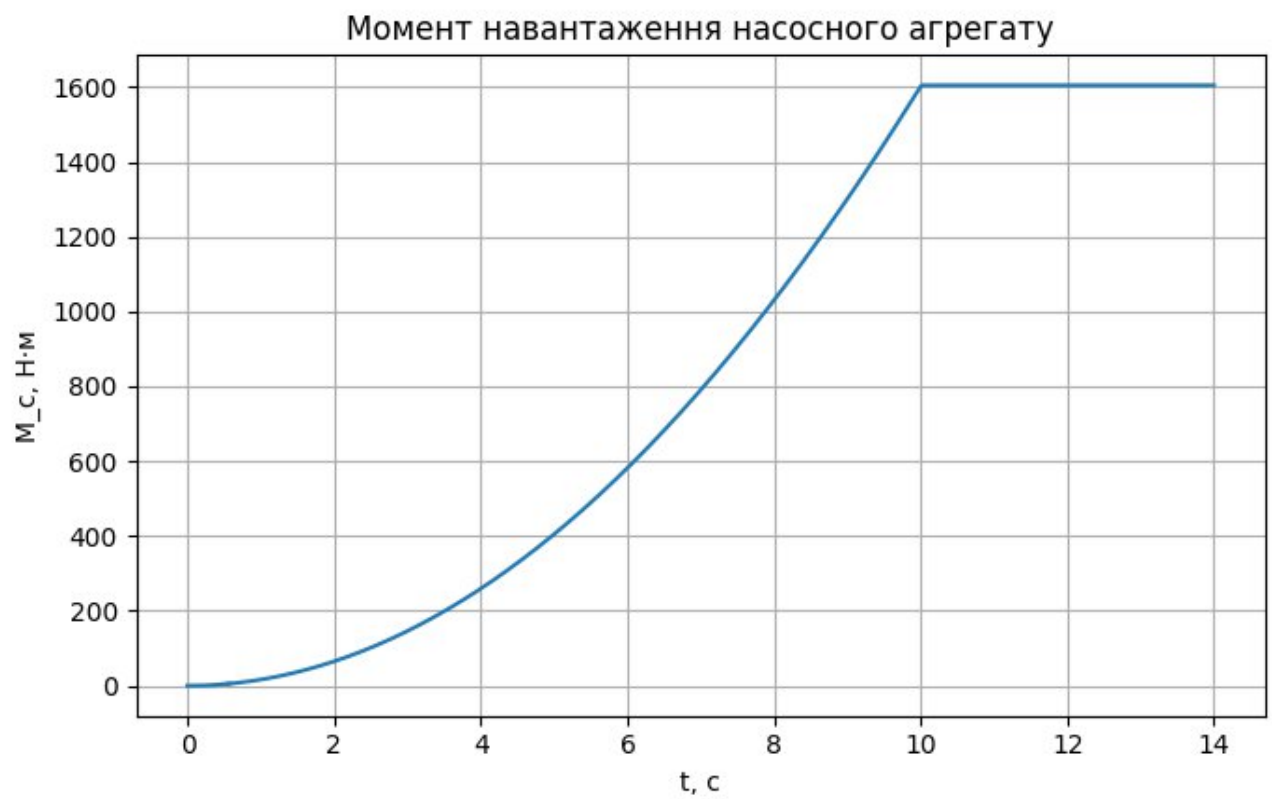


Рисунок 2.18 – Момент навантаження насосного агрегату

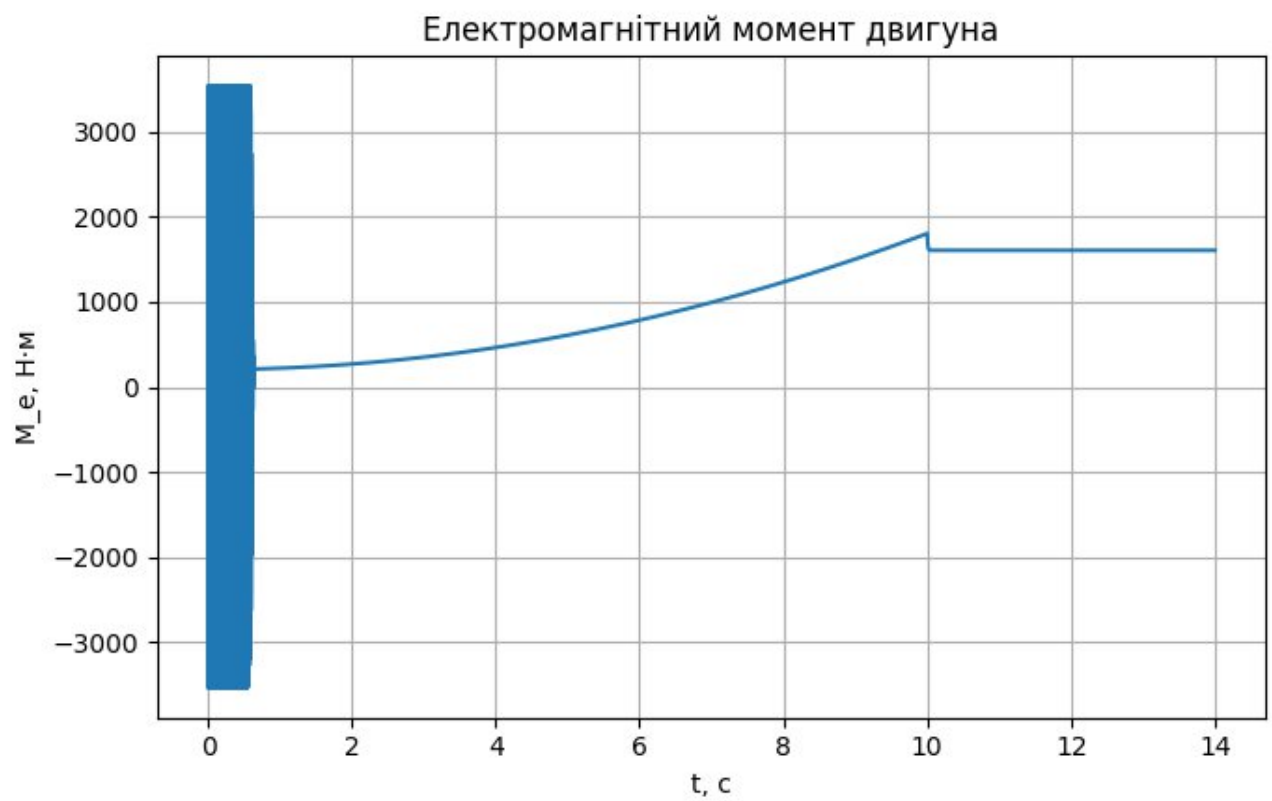


Рисунок 2.19 – Електромагнітний момент двигуна



Перехідний процес швидкості двигуна

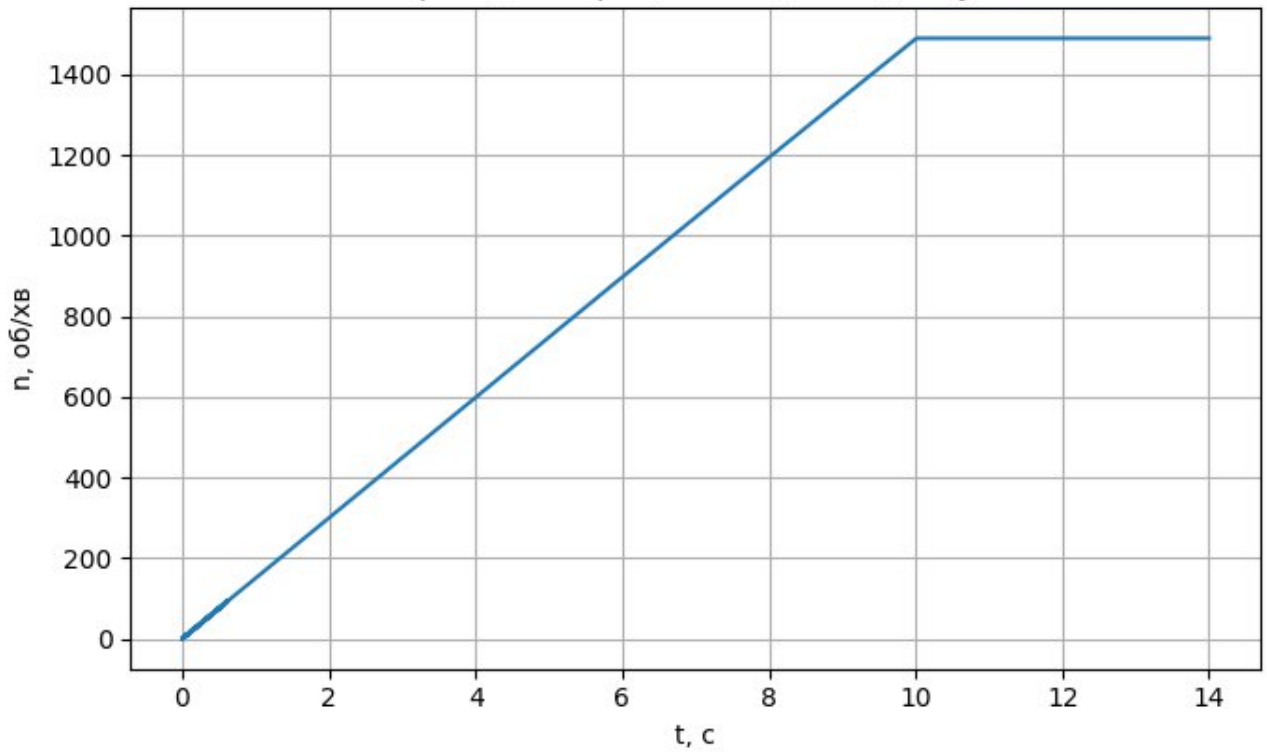


Рисунок 2.20 – Перехідний процес швидкості двигуна

Оціночний струм статора під час пуску

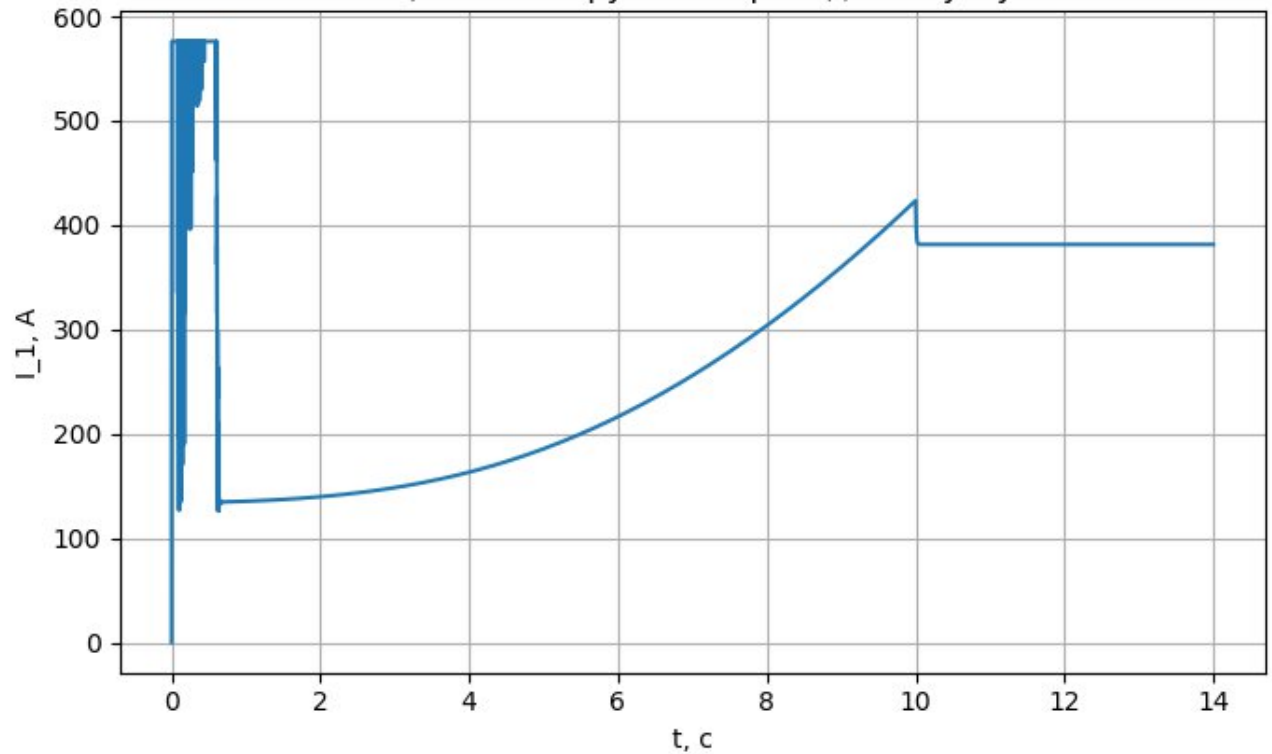


Рисунок 2.21 – Оціночний струм статора під час пуску

Моделювання для параметрів: $\omega=1470$ об/хв, $Q=620$ м³/год, $mH=70$ м, $\eta=88\%$, $I_{max}=1,5I_n$, з системою кервання і задавачем темпу після регулятора струму.

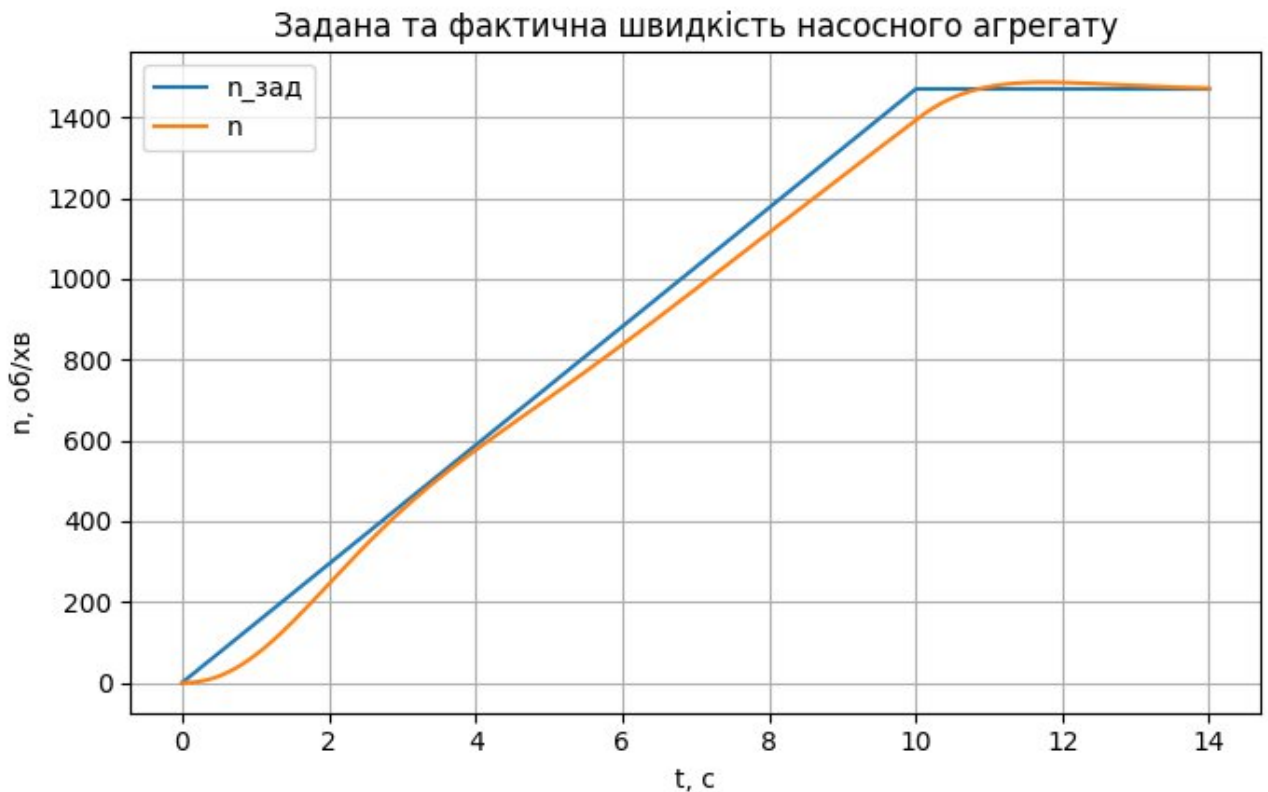


Рисунок 2.22 – Задана та фактична швидкість двигуна

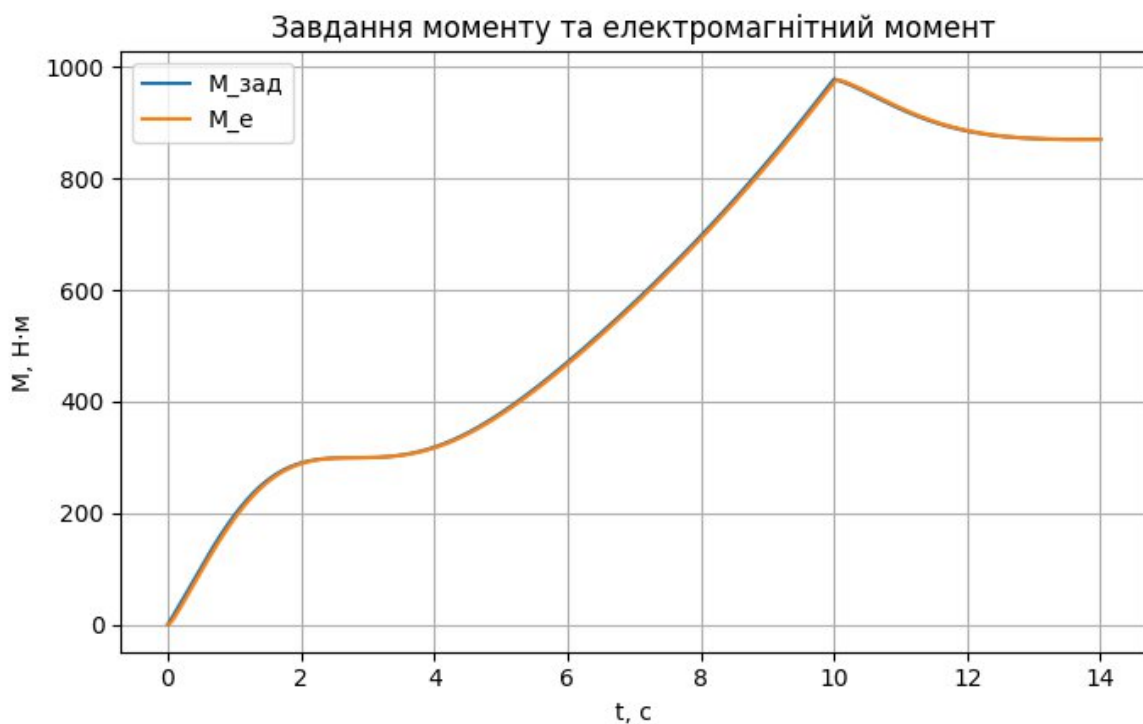


Рисунок 2.23 – Завдання та відпрацювання моменту

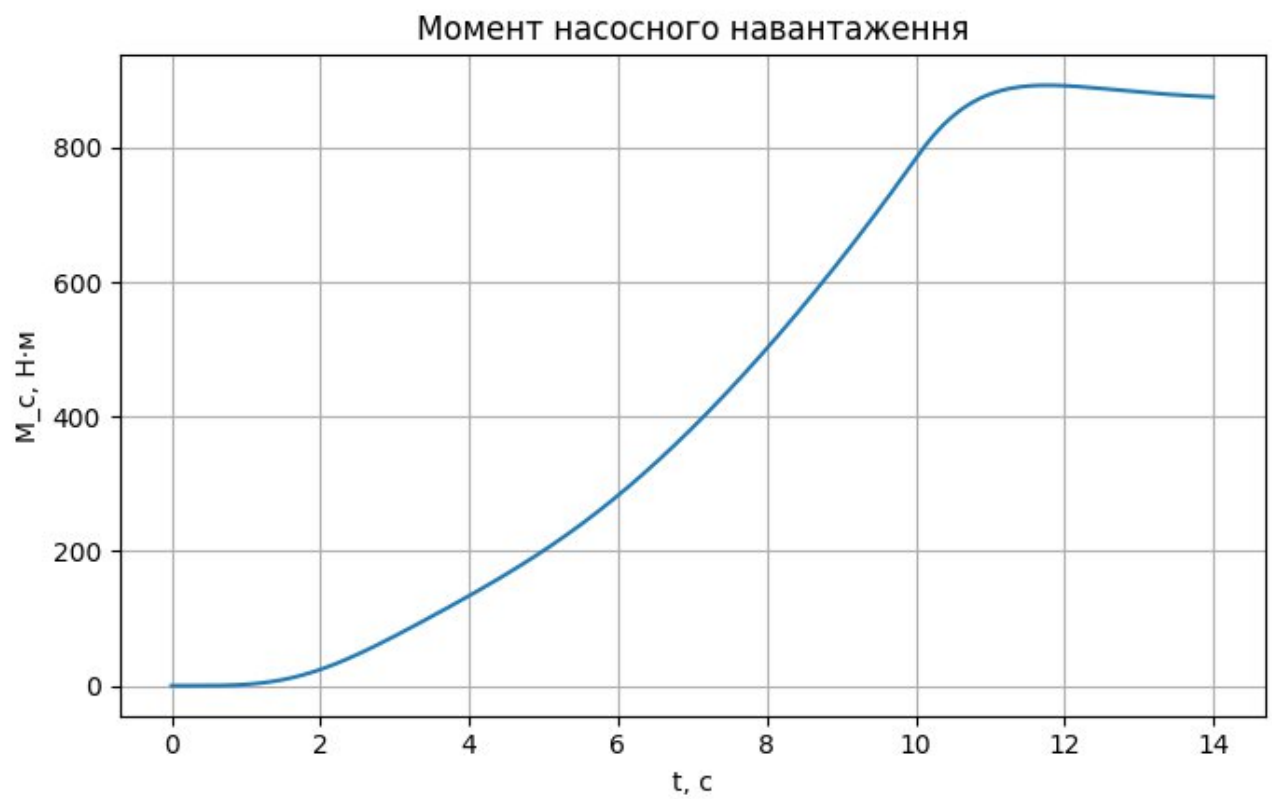


Рисунок 2.24 – Момент насосного навантаження



Рисунок 2.25 – Струм статора з системою кервання та задавачем інтенсивності

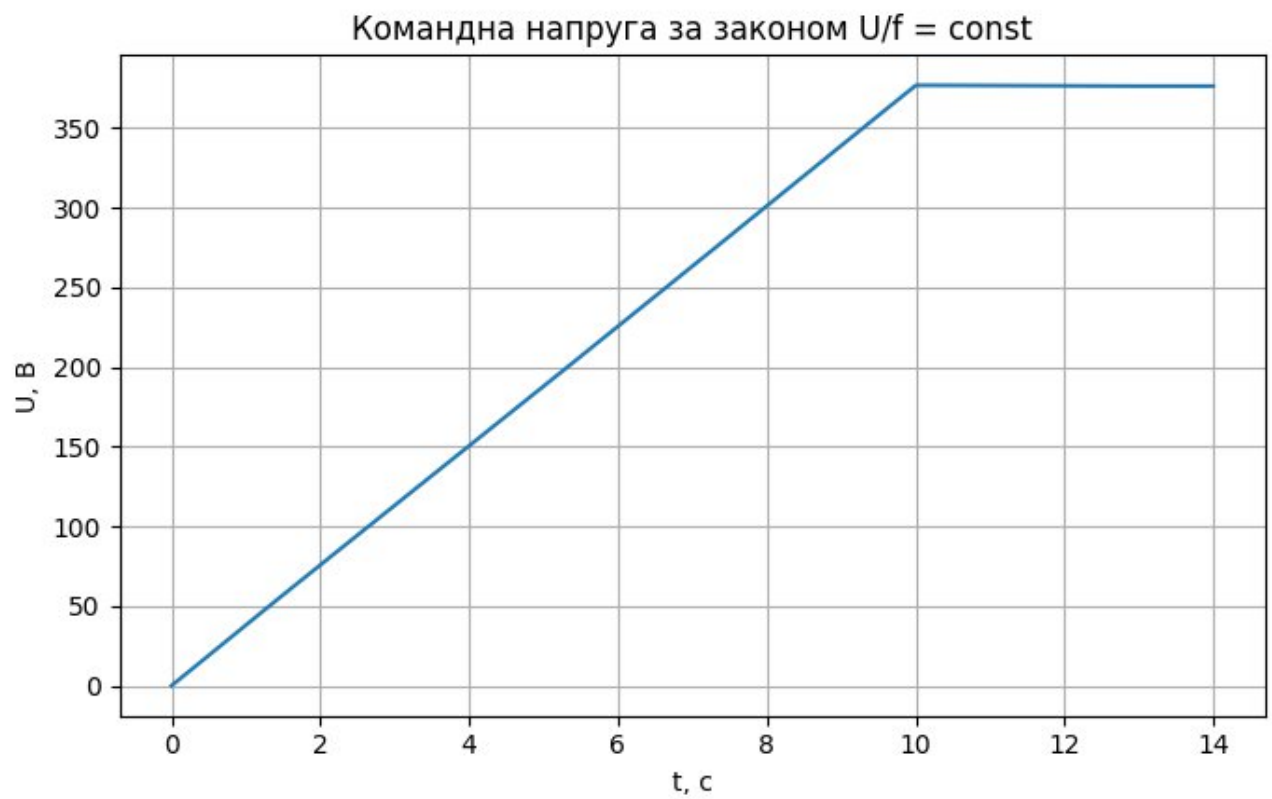


Рисунок 2.26 – Закон завдання швидкості



Рисунок 2.27 – Зміна подачі насосу

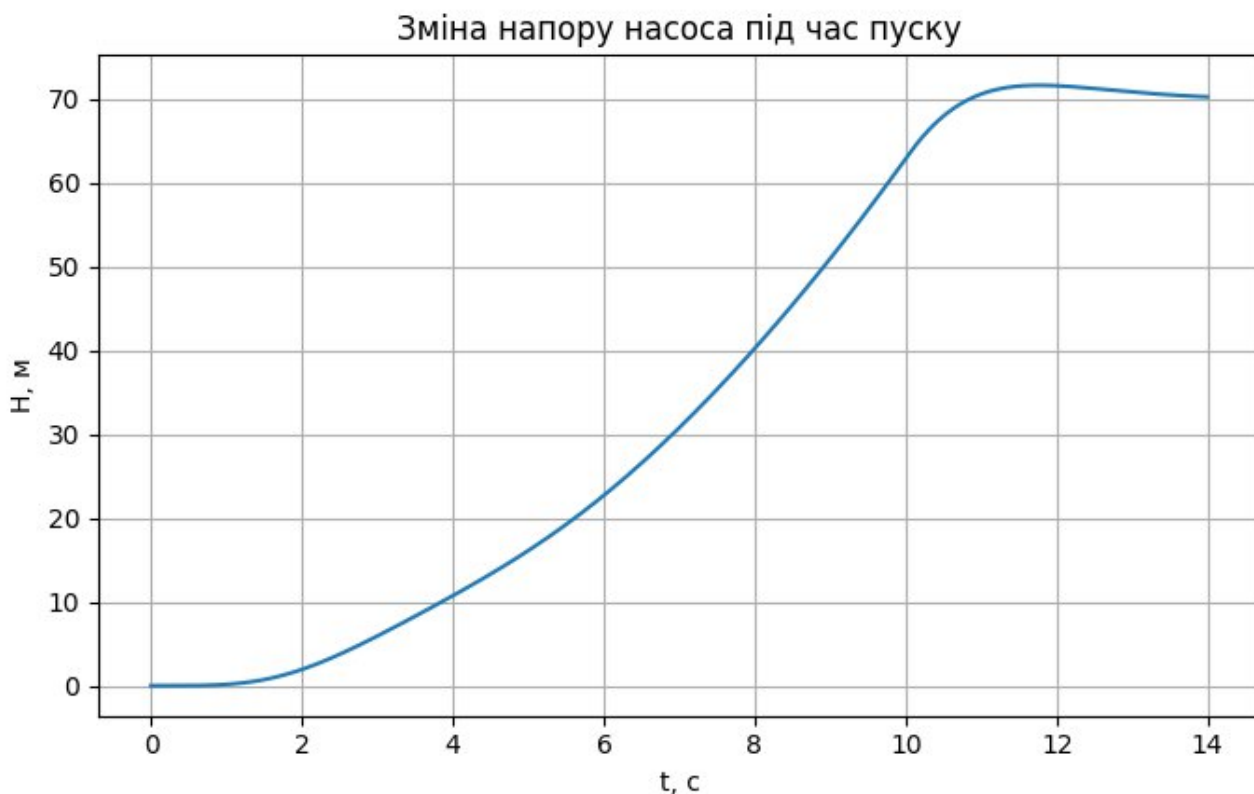


Рисунок 2.28 – Зміна напору

Змодельював пуск насосного агрегату до тиску:

$p_r=5 \text{ кг/см}^2 \approx 50 \text{ м}$

Основні результати:

- 1) цільова швидкість: $\omega \approx 1243 \text{ об/хв}$;
- 2) цільова частота: $\Gamma_{cf} \approx 42,26 \text{ Гц}$;
- 3) напруга за законом $U/f = \text{const}$: $BU \approx 321,2 \text{ В}$;
- 4) розрахункова подача: $Q \approx 524 \text{ м}^3/\text{год}$;
- 5) максимальний струм значно нижчий за обмеження $1,5I_n = 540 \text{ А}$.

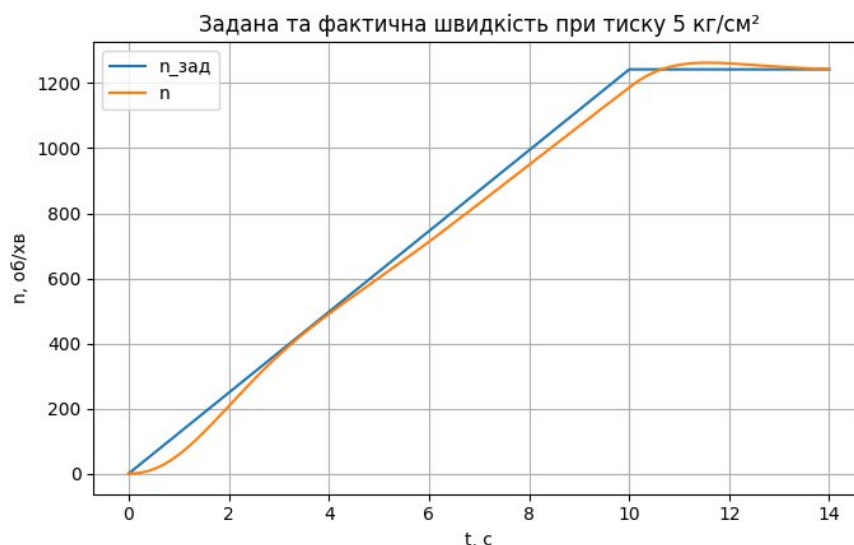


Рисунок 2.29 – Відпрацювання швидкості пр завданні тиску 5 кг/см²

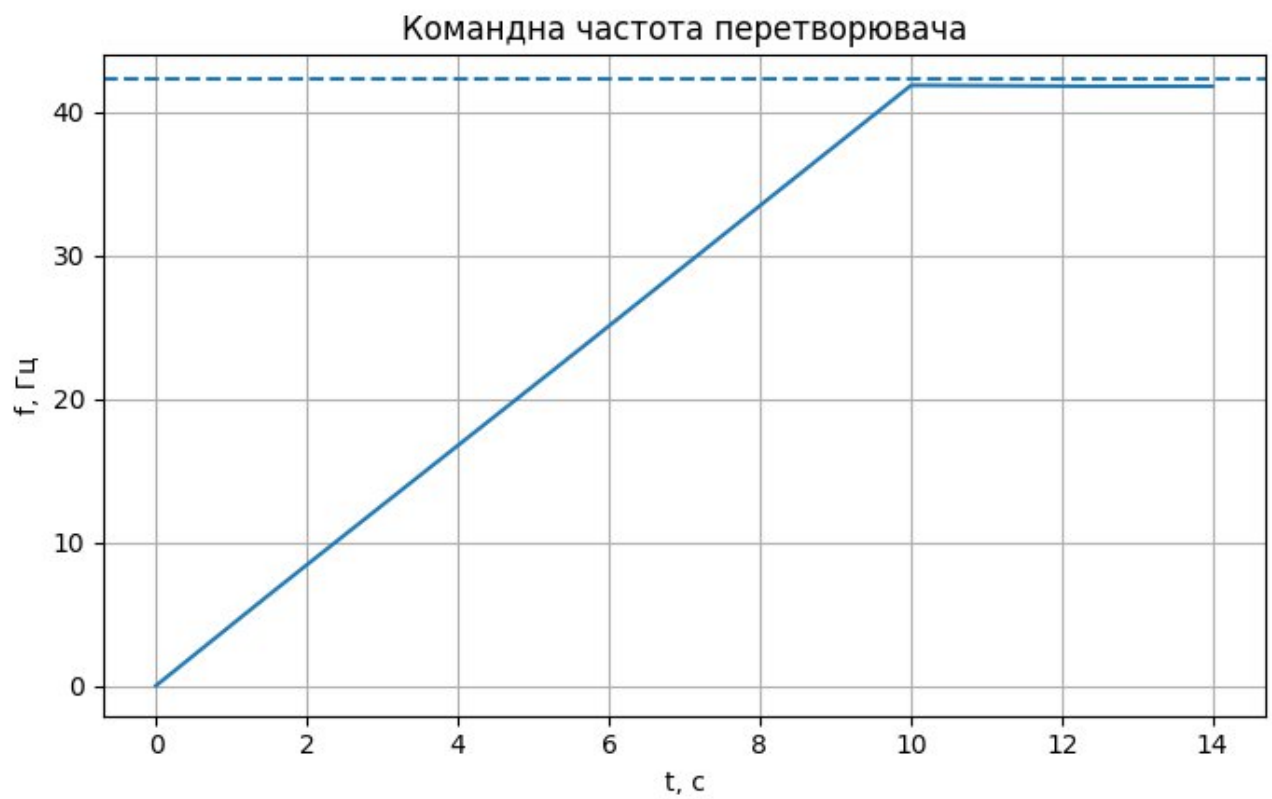


Рисунок 2.30 – Завдання частоти пр завданні тиску 5 кг/см²

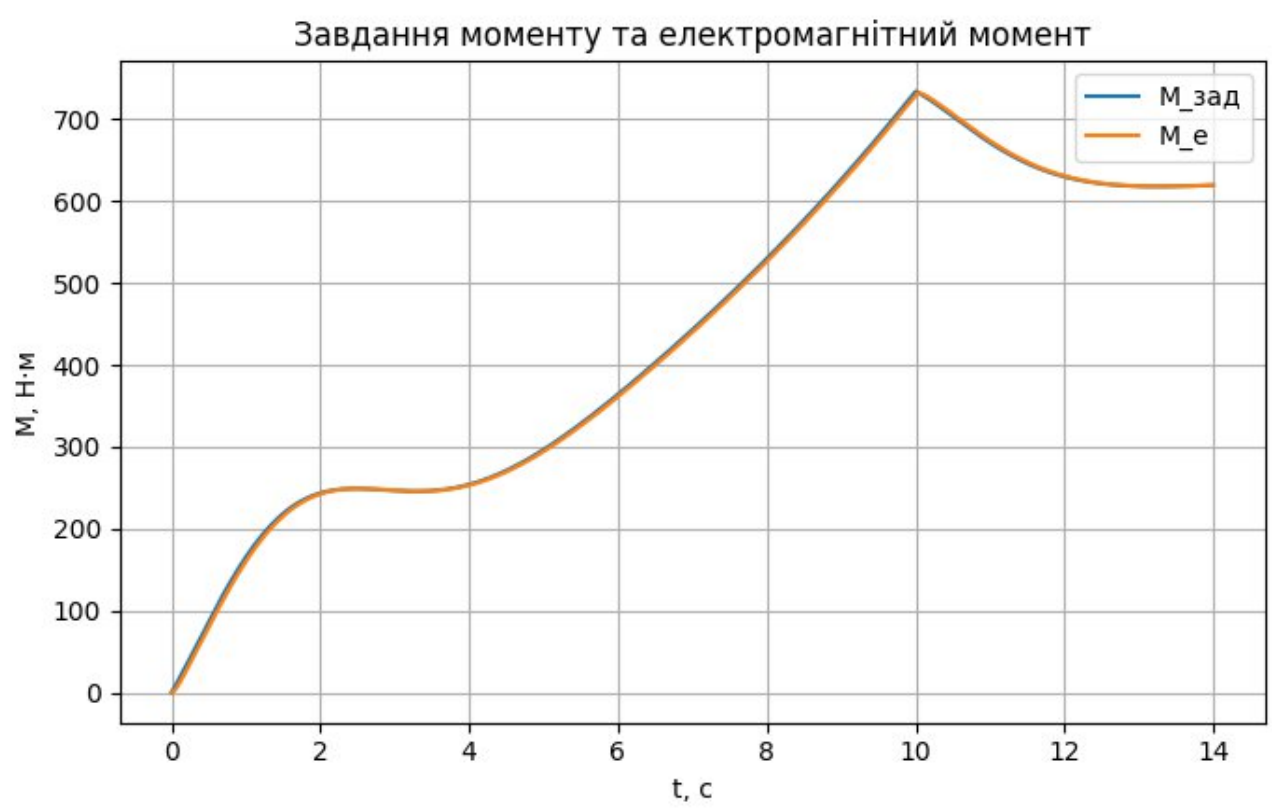


Рисунок 2.31 – Завдання моменту пр завданні тиску 5 кг/см²

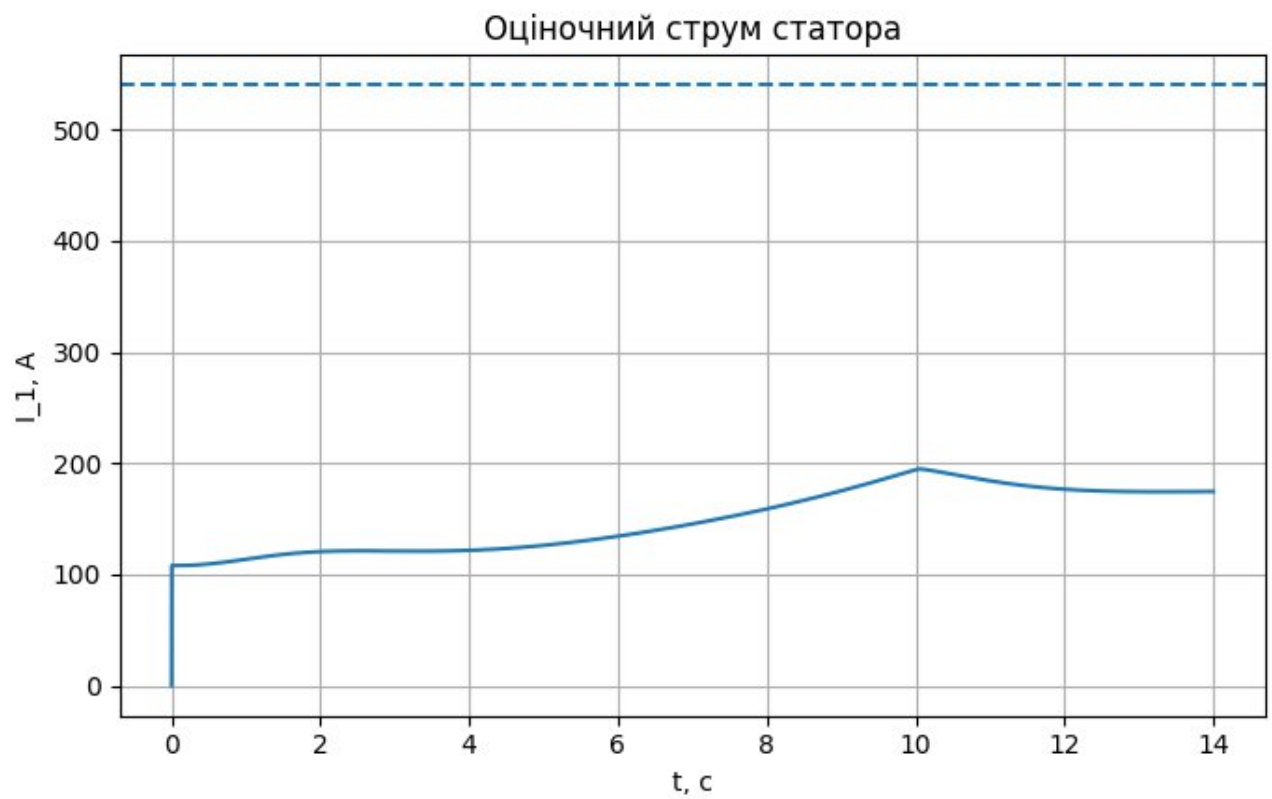


Рисунок 2.32 – Оціночний струм пр завданні тиску 5 кг/см²

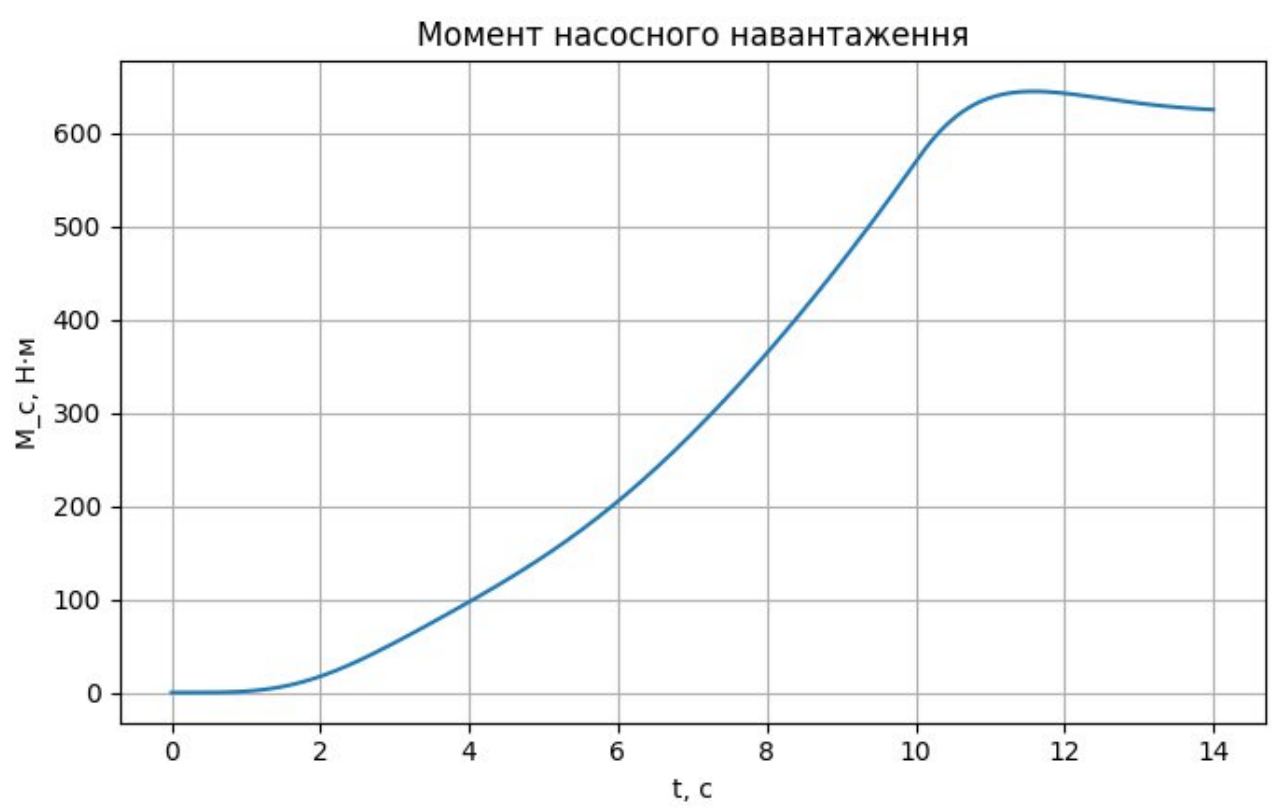


Рисунок 2.33 – Момент насосу пр завданні тиску 5 кг/см²

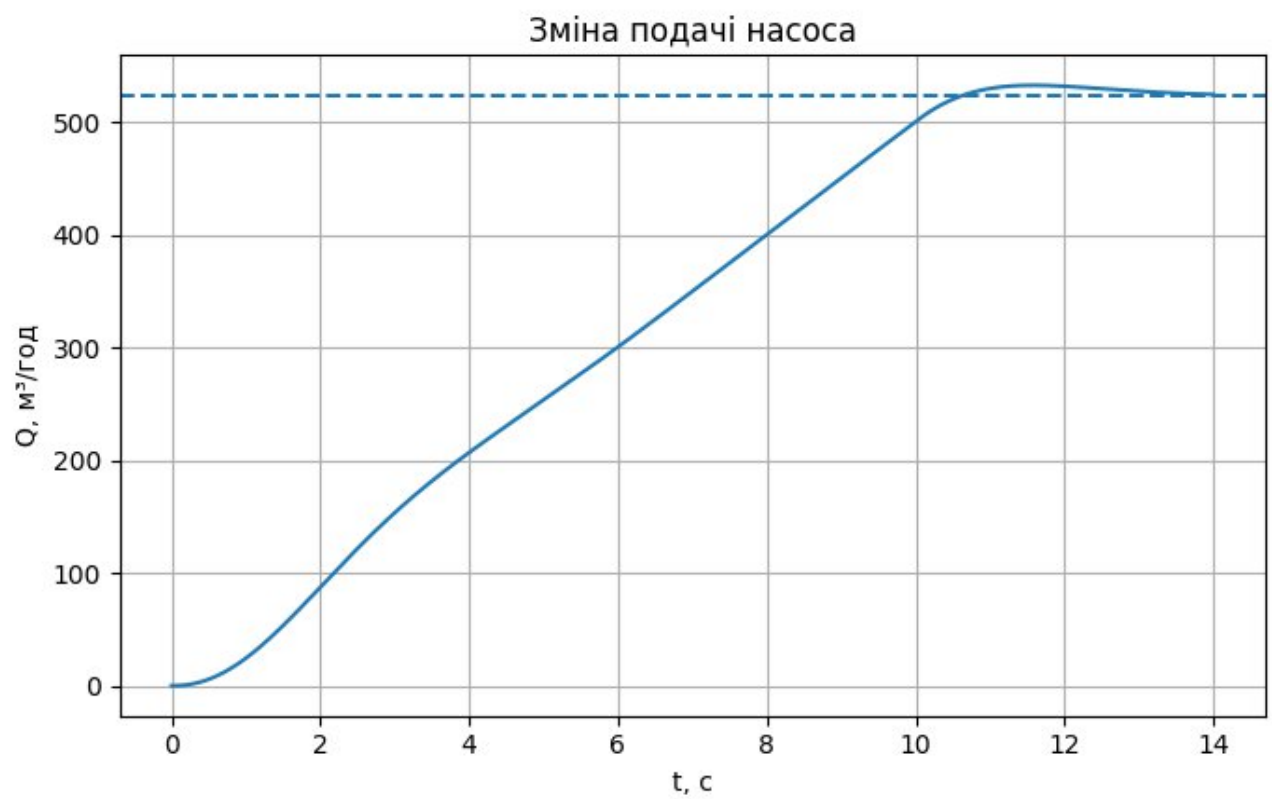


Рисунок 2.34 – Зміна подачі пр завданні тиску 5 кг/см²

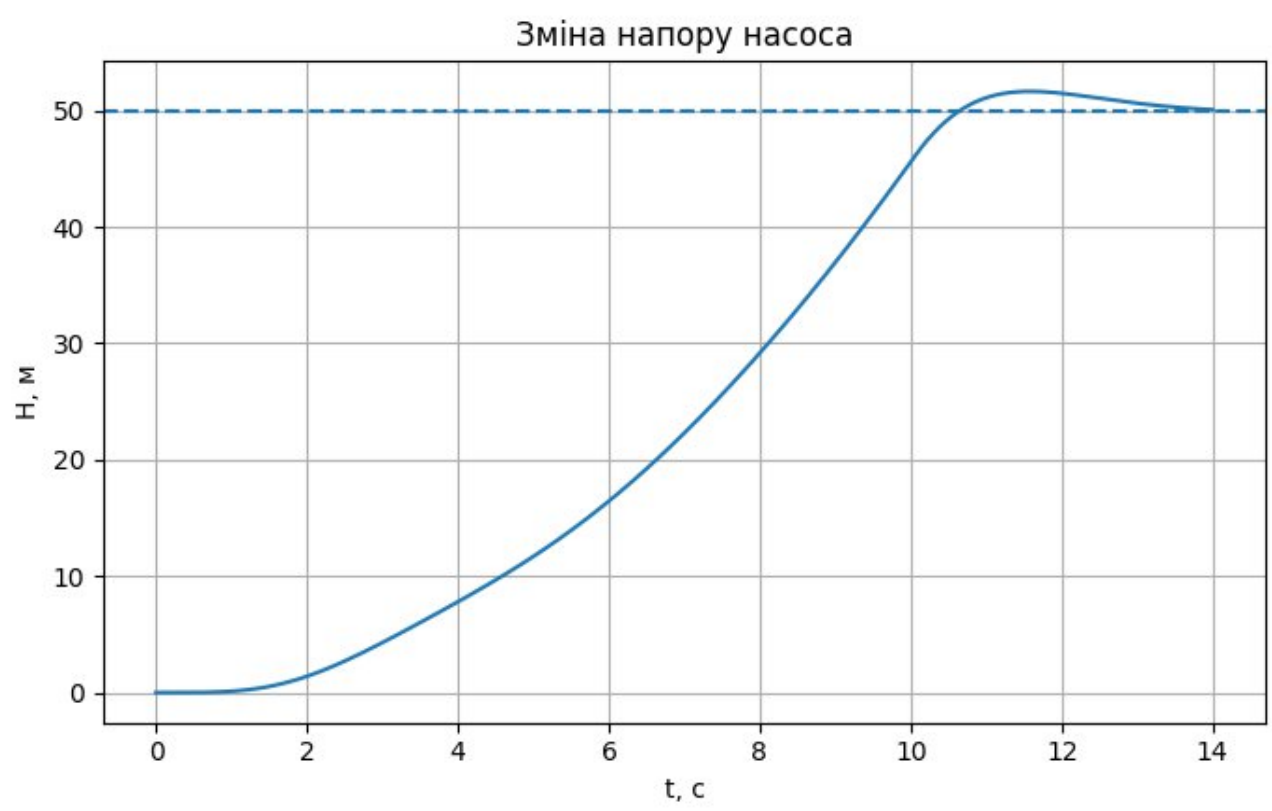


Рисунок 2.35 – Зміна напору пр завданні тиску 5 кг/см²

Час завдання задавача інтенсивності скоротили до 2 с.

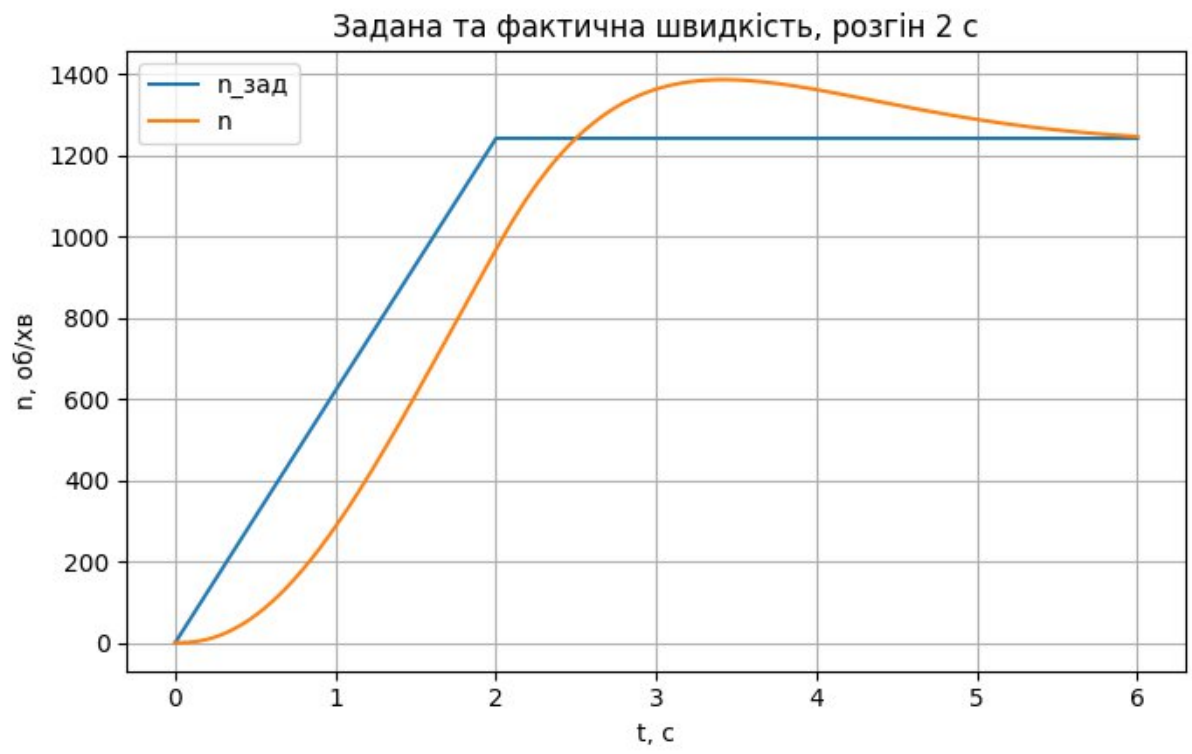


Рисунок 2.36 – Швидкості при завданні тиску 5 кг/см² та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.

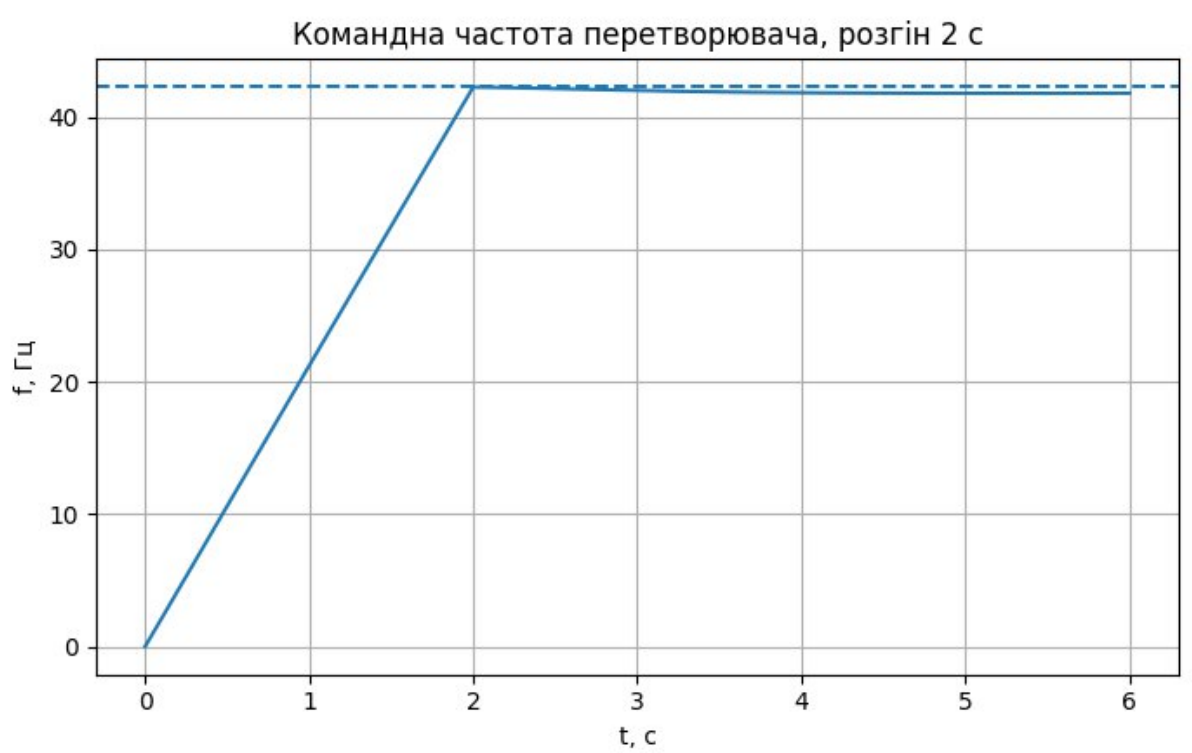


Рисунок 2.37 – Завдання частоти при завданні тиску 5 кг/см² та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.



Рисунок 2.38 – Завдання та закон зміни напруги завдання при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.

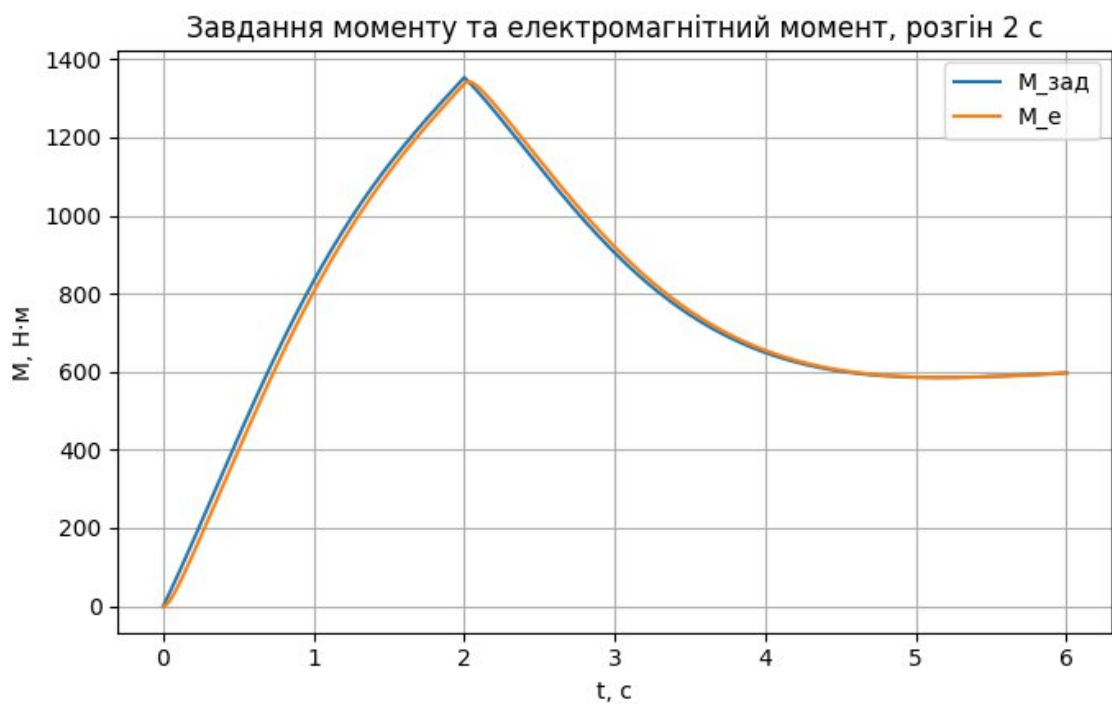


Рисунок 2.39 – Завдання маменту та електромагнітний момент при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.

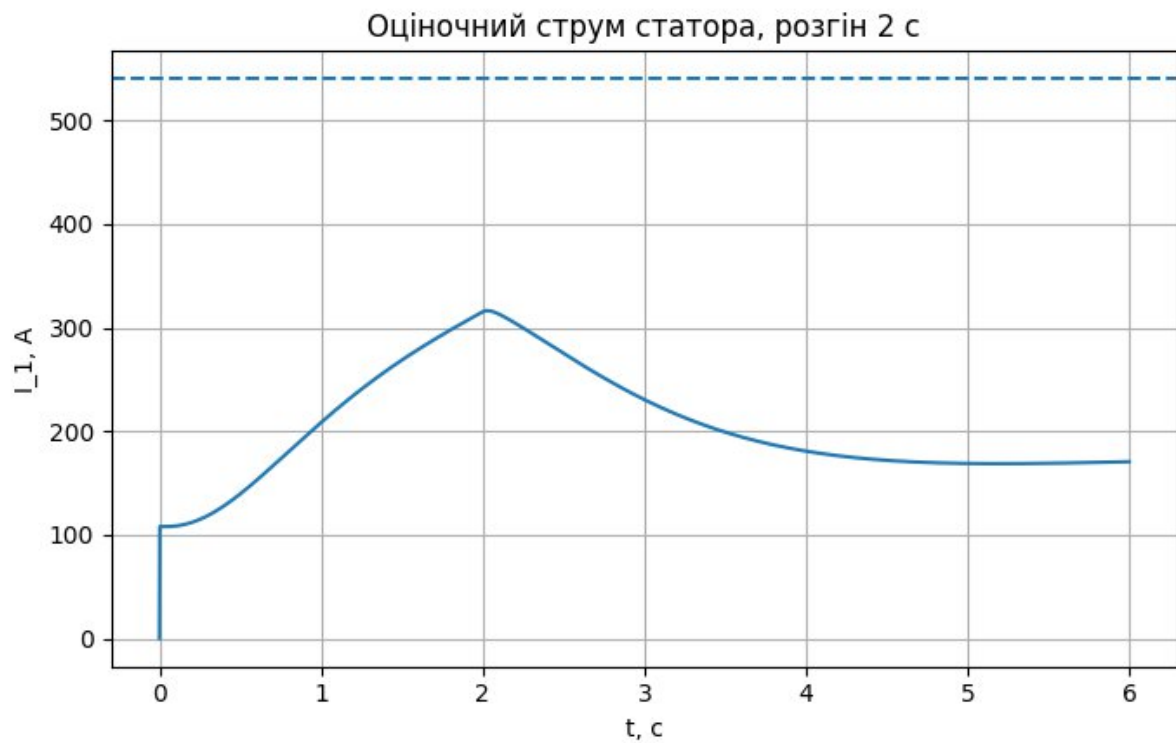


Рисунок 2.40 – Оціночний струм статора при завданні тиску 5 кг/см² та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.

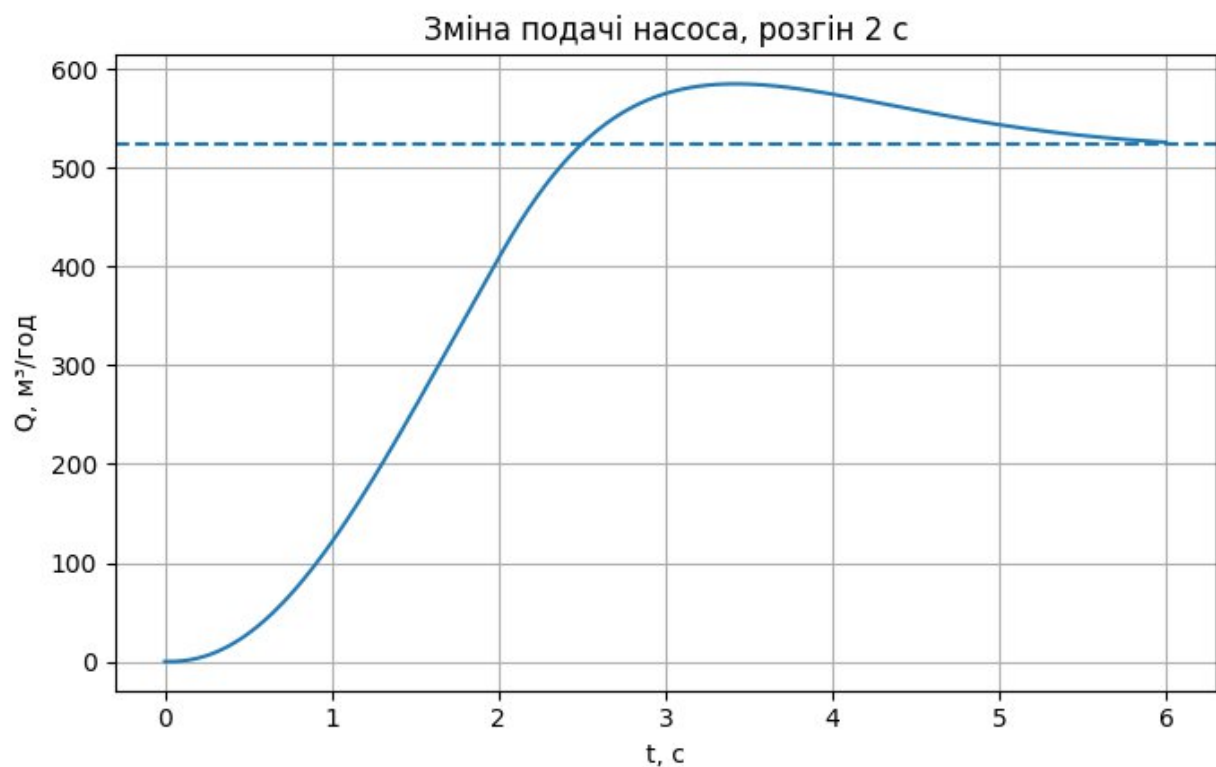


Рисунок 2.41 – Зміна подачі при завданні тиску 5 кг/см² та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.

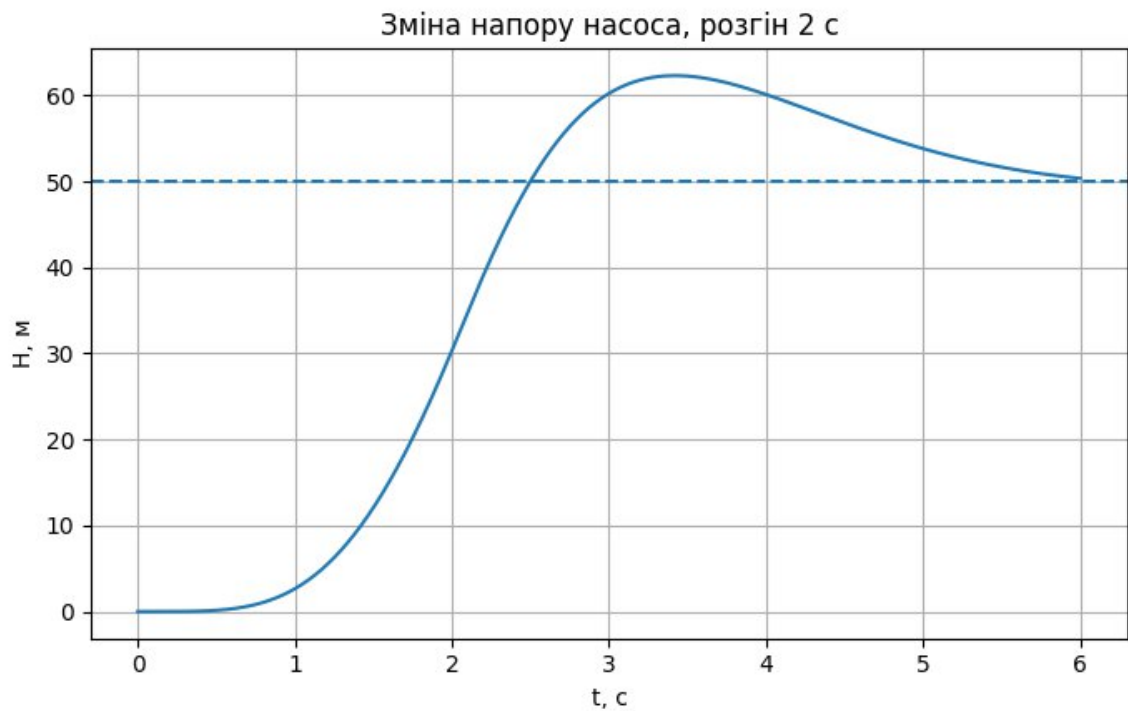


Рисунок 2.42 – Зміна напору при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону на задаваче інтенсивності до 2 с.

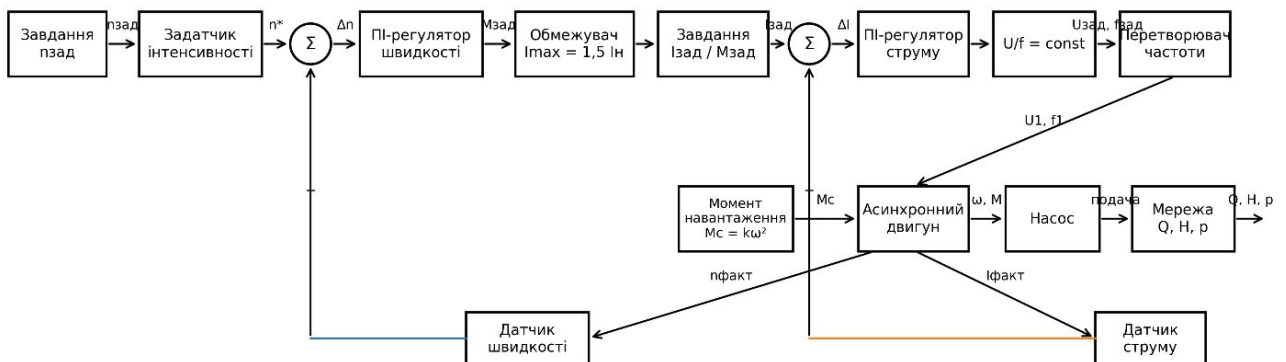


Рисунок 2.43 – Функціональна схема системи підпорядкованого керування

Внутрішній контур струму налаштовано за технічним оптимумом, що забезпечує швидке відпрацювання завдання струму та компенсацію електромагнітної сталої часу двигуна. Зовнішній контур швидкості налаштовано за симетричним оптимумом, оскільки об'єкт регулювання містить інтегрвальну ланку механічної частини та малу некомпенсовану сталу часу внутрішнього контуру струму. Такий підхід забезпечує узгоджену роботу контурів підпорядкованого керування та обмеження пускового струму на рівні $1,5I_n$.

Моделювання яу що в системі зворотної відсутній зв'язок по тиску, і без задавача інтенсивності.

Результат: система швидко виходить на режим, але фактичний напір стабілізується нижче заданих 50 м – близько 45 м. Це пов'язано з тим, що регулятор струму, формуючи частоту, не забезпечує прямого регулювання тиску або швидкості без додаткової корекції.

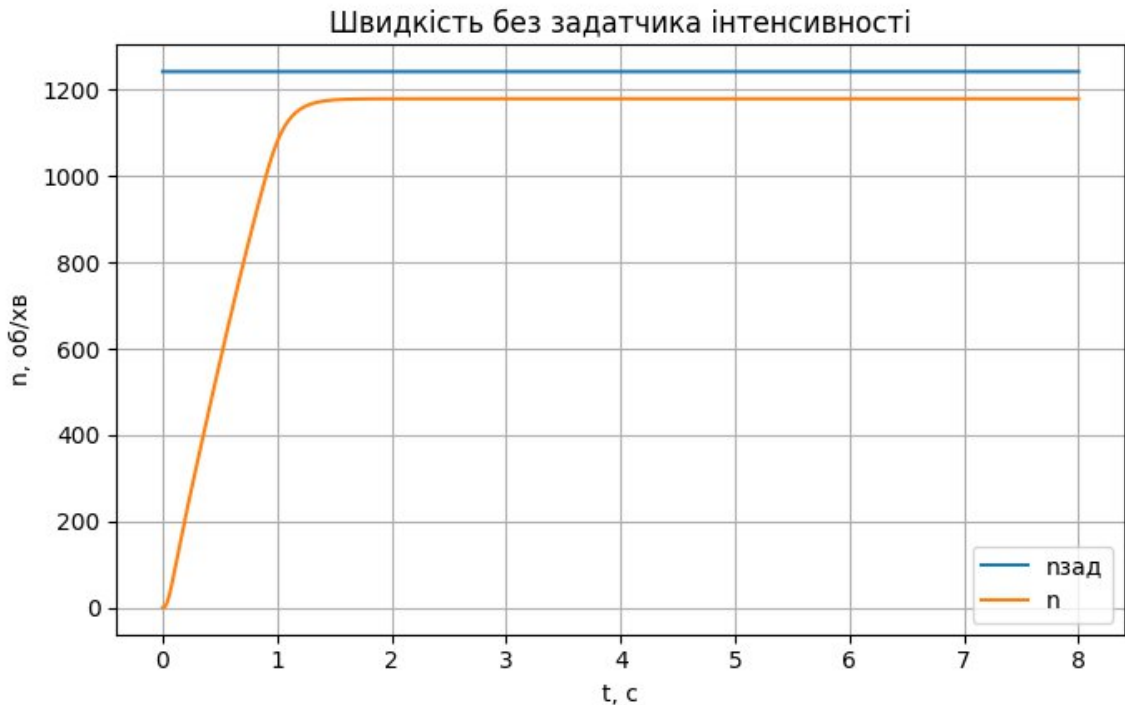


Рисунок 2.44 – Зміна швидкості при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

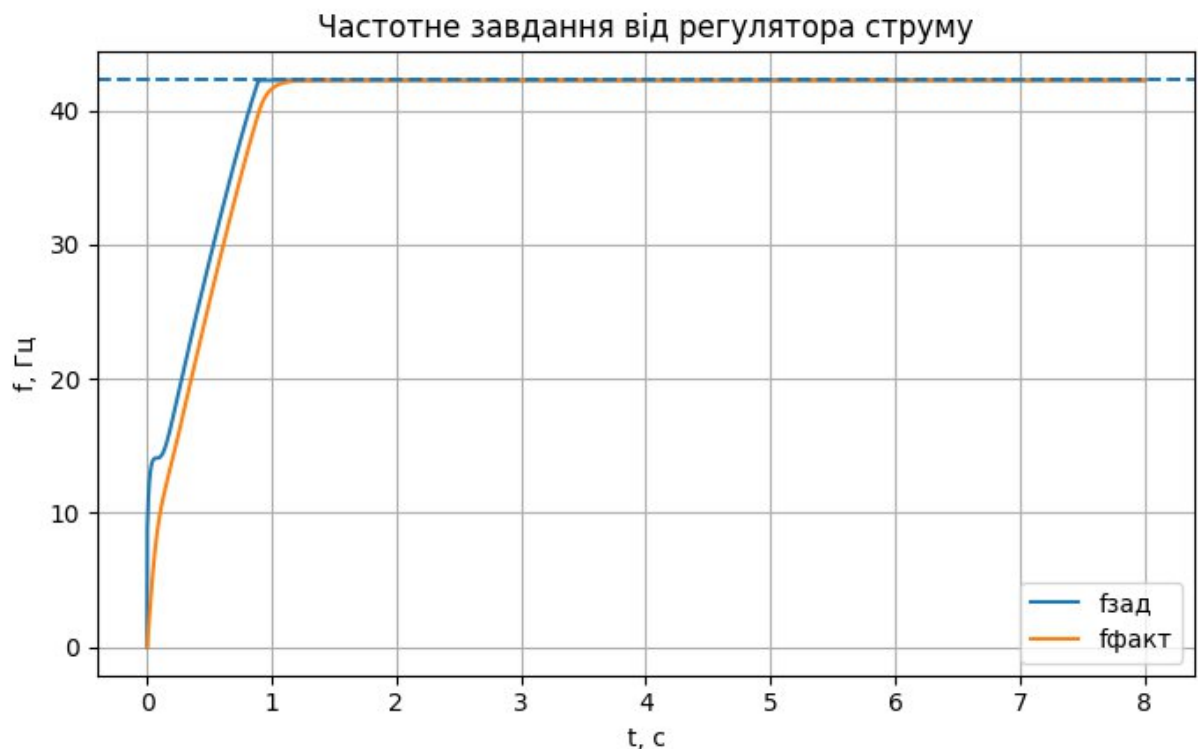


Рисунок 2.45 – Завдання частоти при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

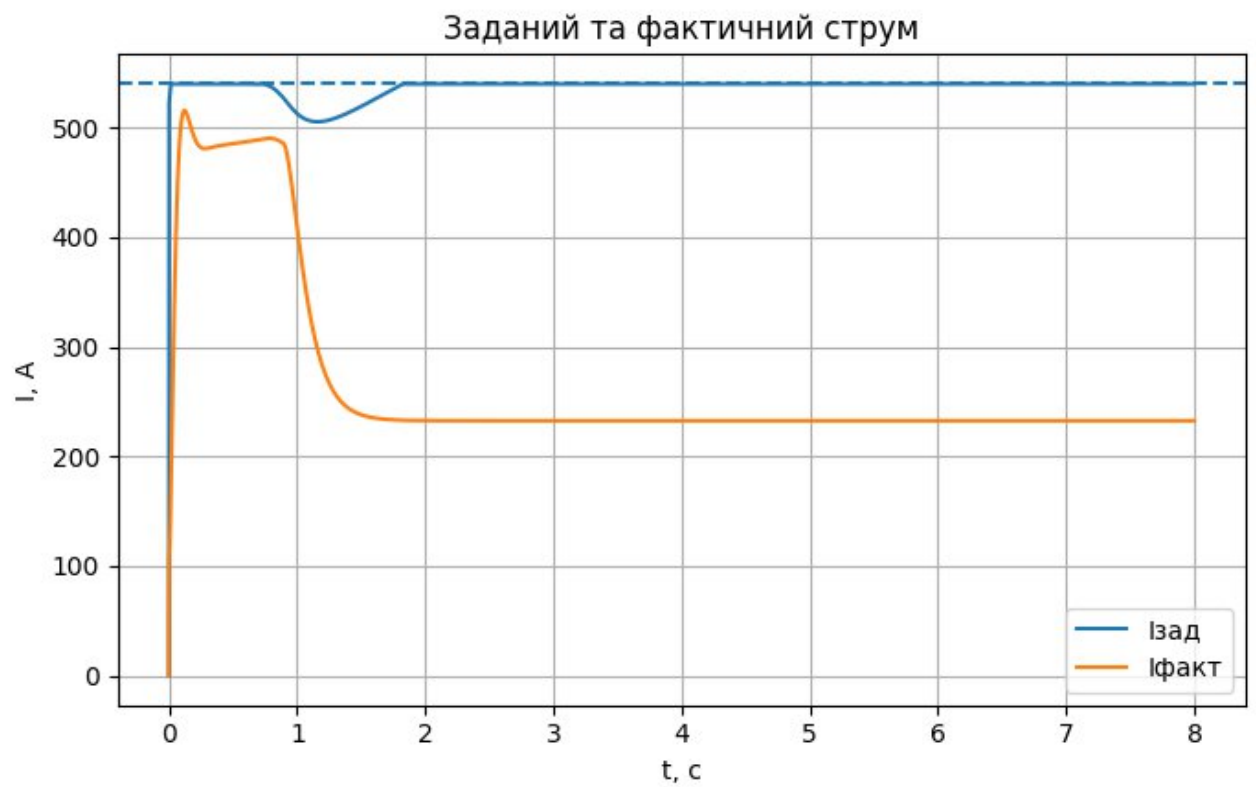


Рисунок 2.46 – Зміна струму при завданні тиску 5 кг/см² та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

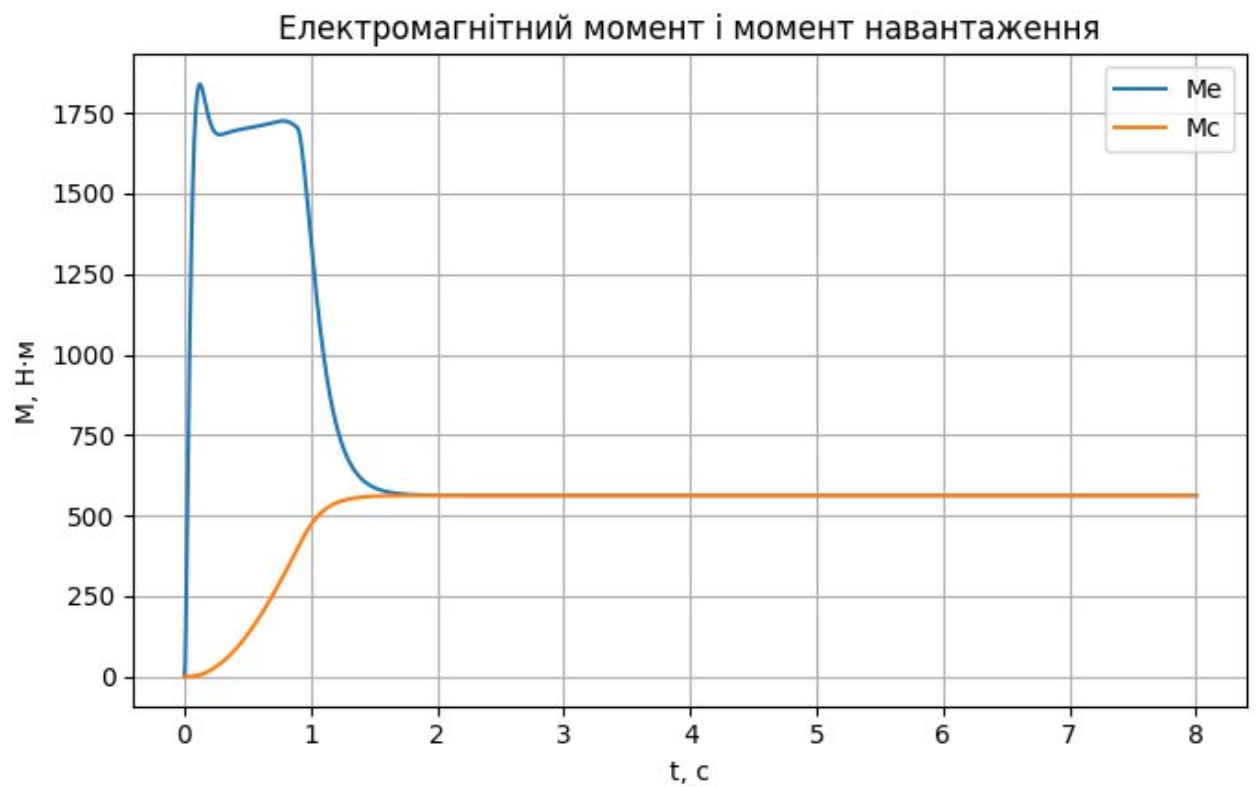


Рисунок 2.47 – Зміна моментів при завданні тиску 5 кг/см² та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

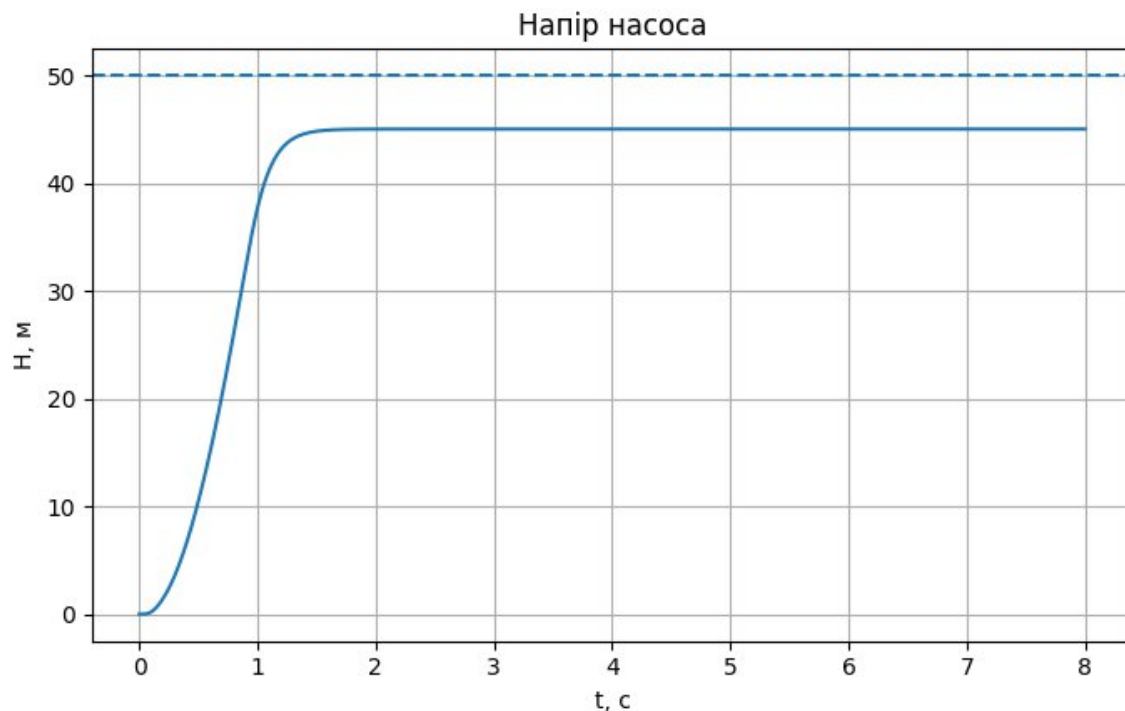


Рисунок 2.48 – Зміна напору при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

Моделювання системи з регулятором тиску та зворотним зв'язком за тиском

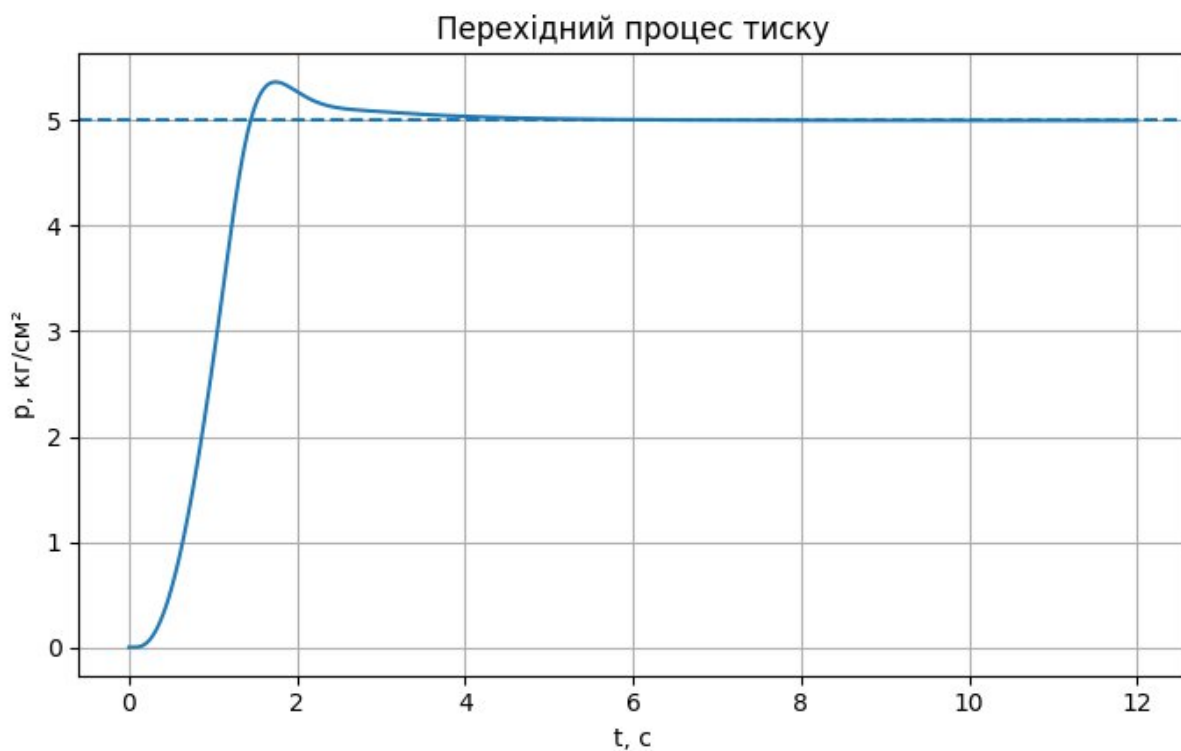


Рисунок 2.49 – Зміна тиску при завданні тиску 5 кг/см^2 зі зворотнім зв'язком за тиском

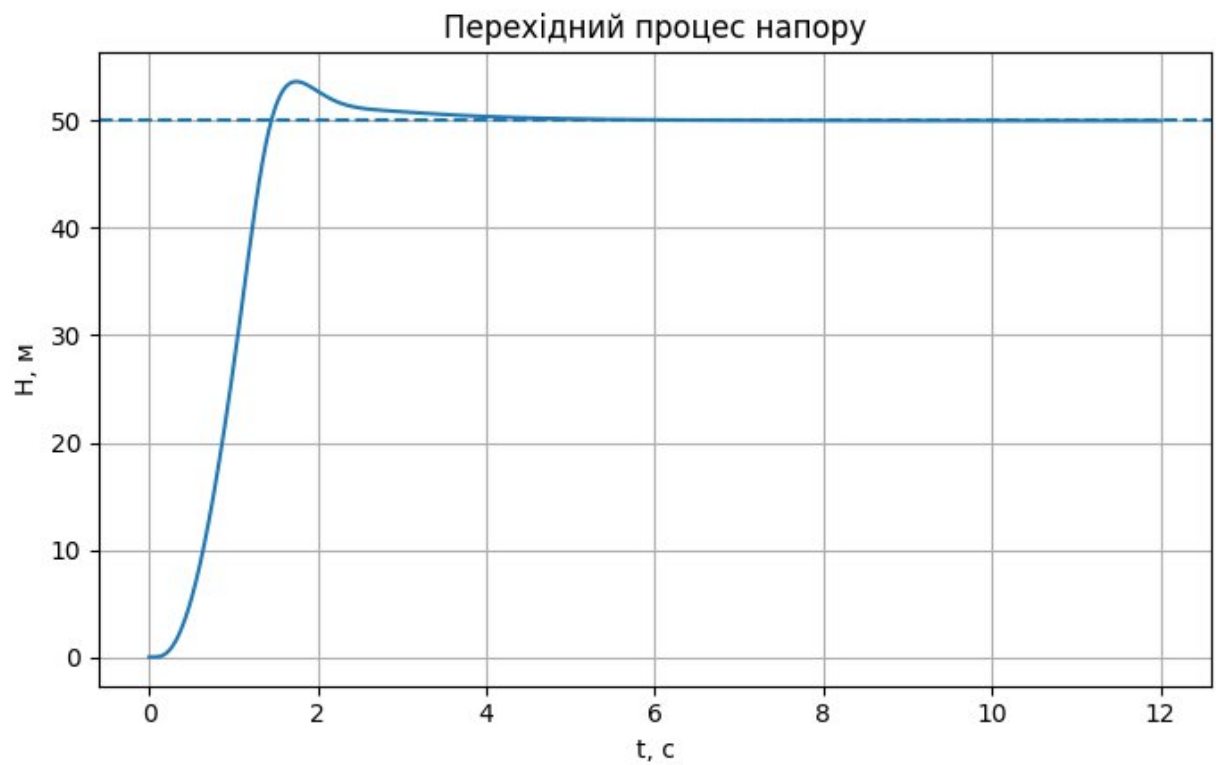


Рисунок 2.50 – Зміна напору при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

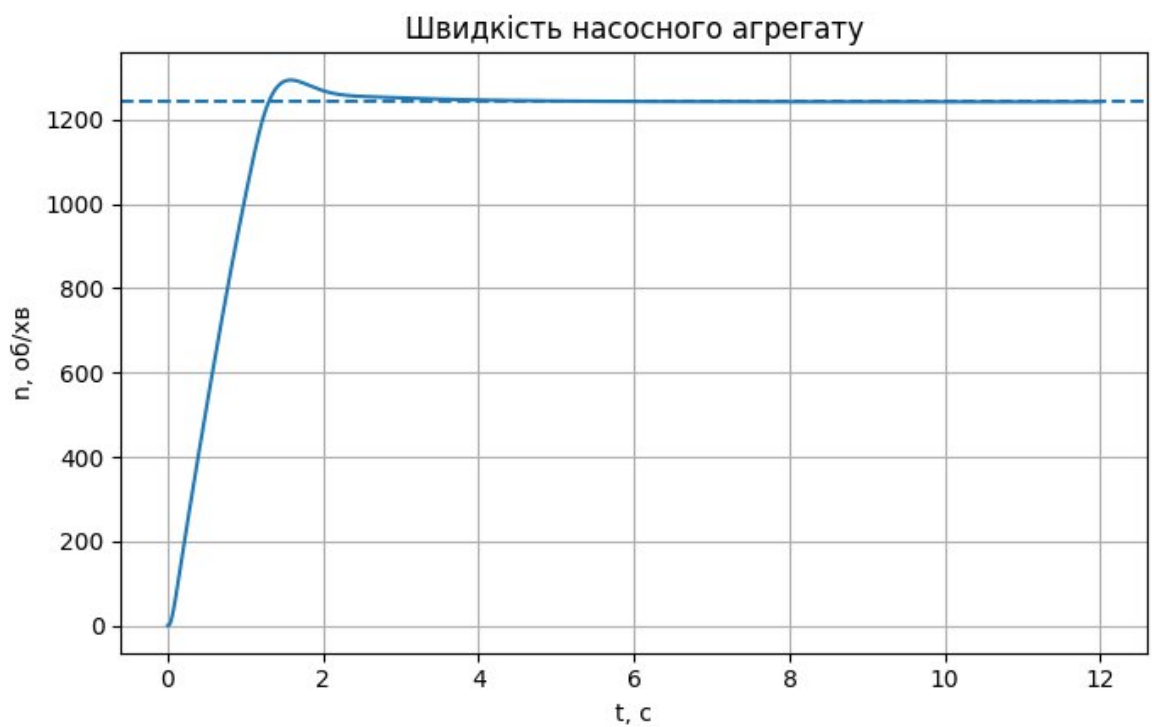


Рисунок 2.51 – Зміна швидкості при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

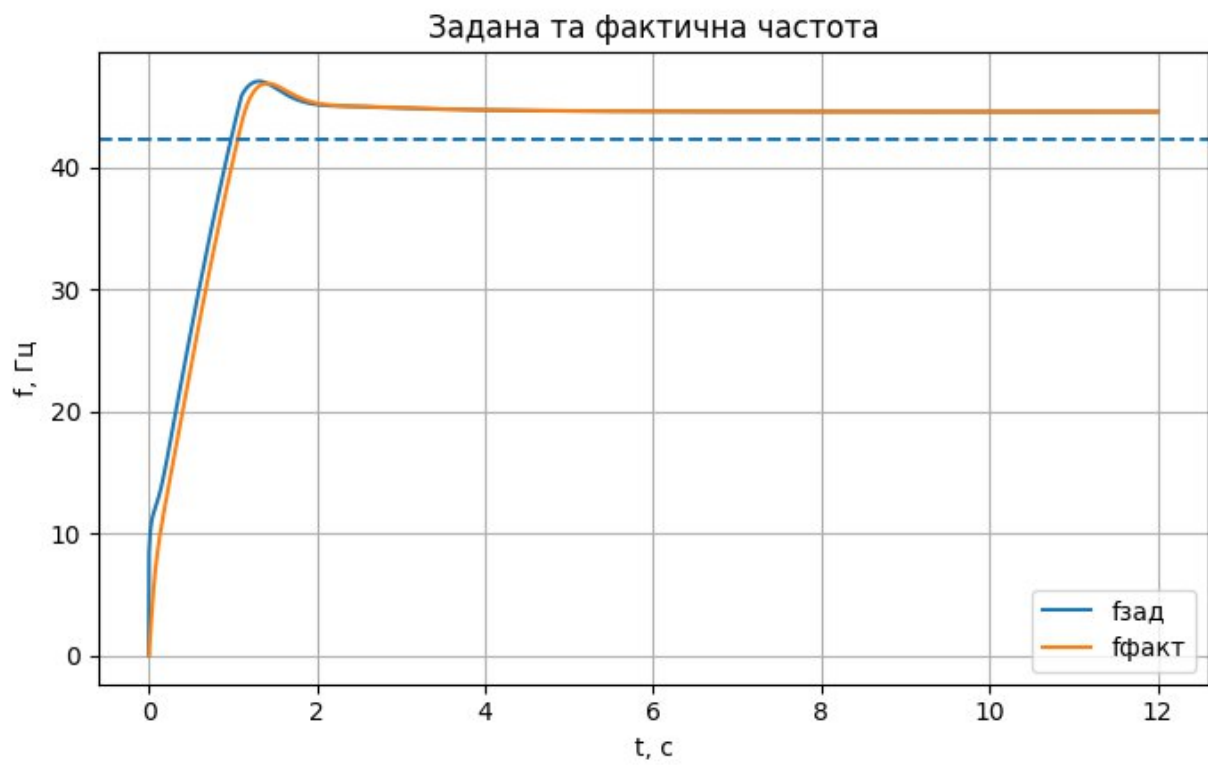


Рисунок 2.52 – Зміна частоти завдання при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

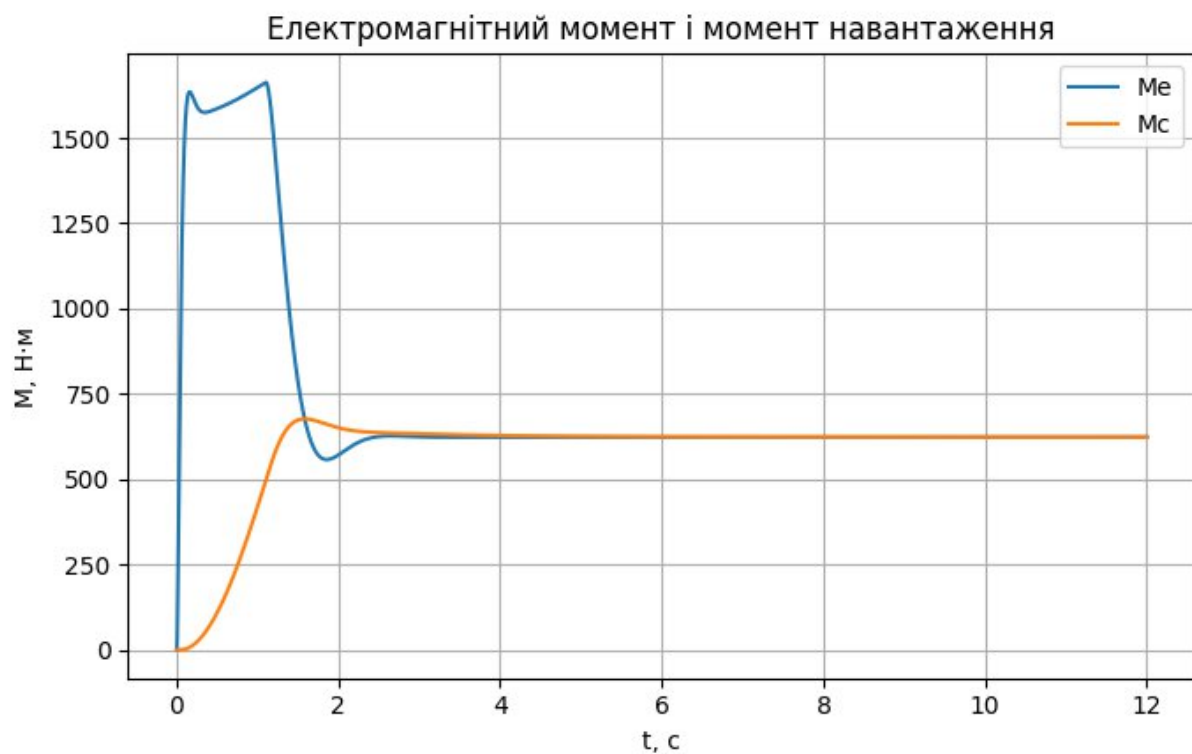


Рисунок 2.53 – Зміна моментів при завданні тиску 5 кг/см^2 та зменшення часу розгону без задавача інтенсивності

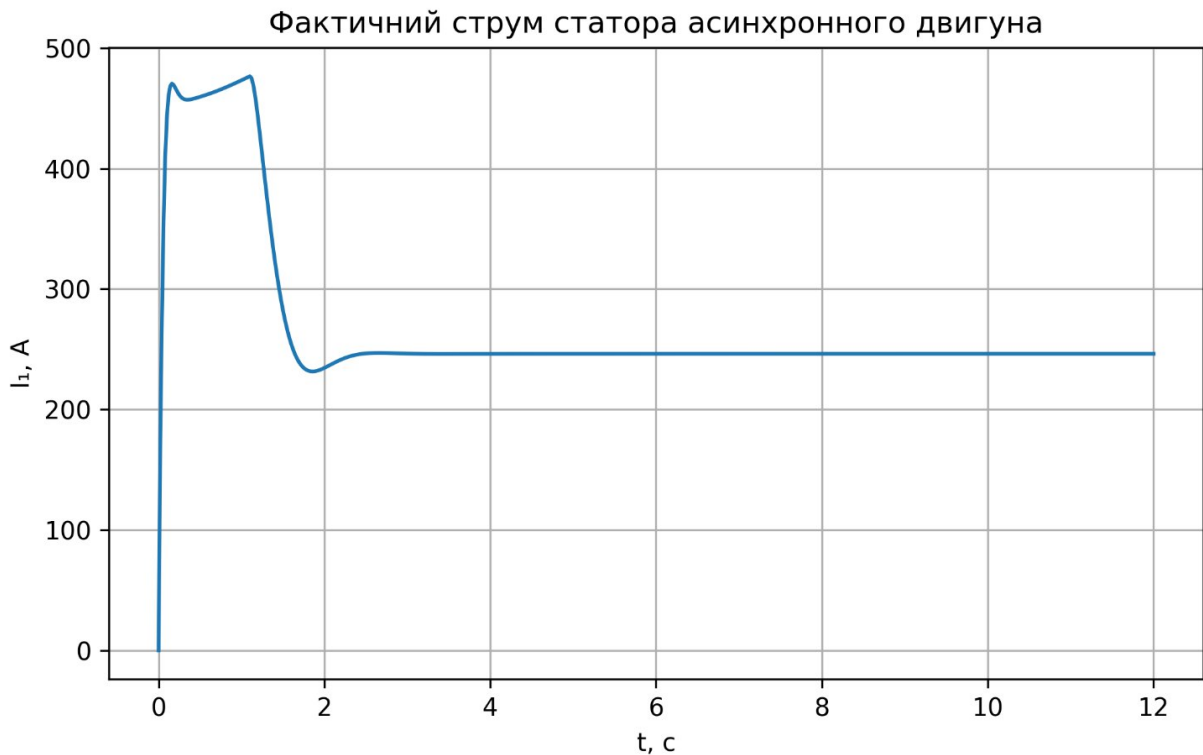


Рисунок 2.54 – Зміна струму при завданні тиску 5 кг/см² та зменшенні часу розгону без задавача інтенсивності

При моделюванні електропривода насосного агрегату асинхронний двигун подано спрощеною електромеханічною моделлю. Електромагнітні процеси двигуна не розглядалися окремо, а електромагнітний момент визначався пропорційним струму статора. Механічна частина двигуна та насосного агрегату описувалася рівнянням руху з урахуванням сумарного моменту інерції та квадратичної залежності моменту навантаження від швидкості обертання, характерної для відцентрових насосів.

2.5.1 Спрощена модель асинхронного двигуна

Електромагнітна частина:

$$M_e = K_M I_1 \quad (2.53)$$

де M_e - електромагнітний момент двигуна;

I_1 - струм статора;

K_M - коефіцієнт перетворення струму в момент.

Механічна частина:

$$J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c J \quad (2.54)$$

або в операторній формі:

$$W_m(s) = \frac{\omega(s)}{M_c(s) - M_c(s)} = \frac{1}{J_\Sigma s} \quad (2.55)$$

Для насосного навантаження:

$$M_c = M_{сн} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \quad (2.56)$$

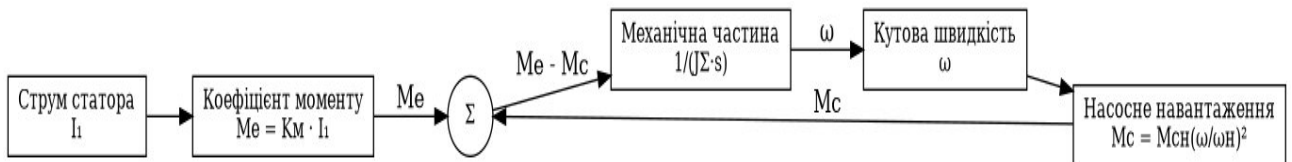


Рисунок 2.55 – Спрощена структурна модель асинхронного двигуна з насосним навантаженням, використана під час моделювання системи керування

3 РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІКИ

3.1 Аналіз електроспоживання насосної станції

Відомо, що потужність електродвигуна становить 250 кВт. Двигун працює безперервно протягом 24 годин на добу, тому річний фонд часу його роботи складає 8766 годин. Тоді річне споживання електричної енергії визначається за формулою:

$$E = P \cdot t; \quad (3.1)$$

де P - потужність (кВт)
 t - час роботи (години)

$$E_1 = 250 \cdot 10^3 \cdot 8766 = 2\,191\,500 \text{ кВт};$$

Для визначення споживання електричної енергії після впровадження частотного перетворювача проаналізуємо графік тиску, наведений на рисунку 3.1. З графіка видно, що тиск у системі протягом тривалого часу підтримується на рівні близько 6 кг/см², тоді як технологічно необхідне значення становить 5 кг/см². Це свідчить про роботу насосного агрегату з надлишковою продуктивністю та зайвими витратами електроенергії. Застосування частотного регулювання дозволить підтримувати необхідний тиск на заданому рівні, зменшити швидкість обертання електродвигуна та, відповідно, скоротити споживання електричної енергії.

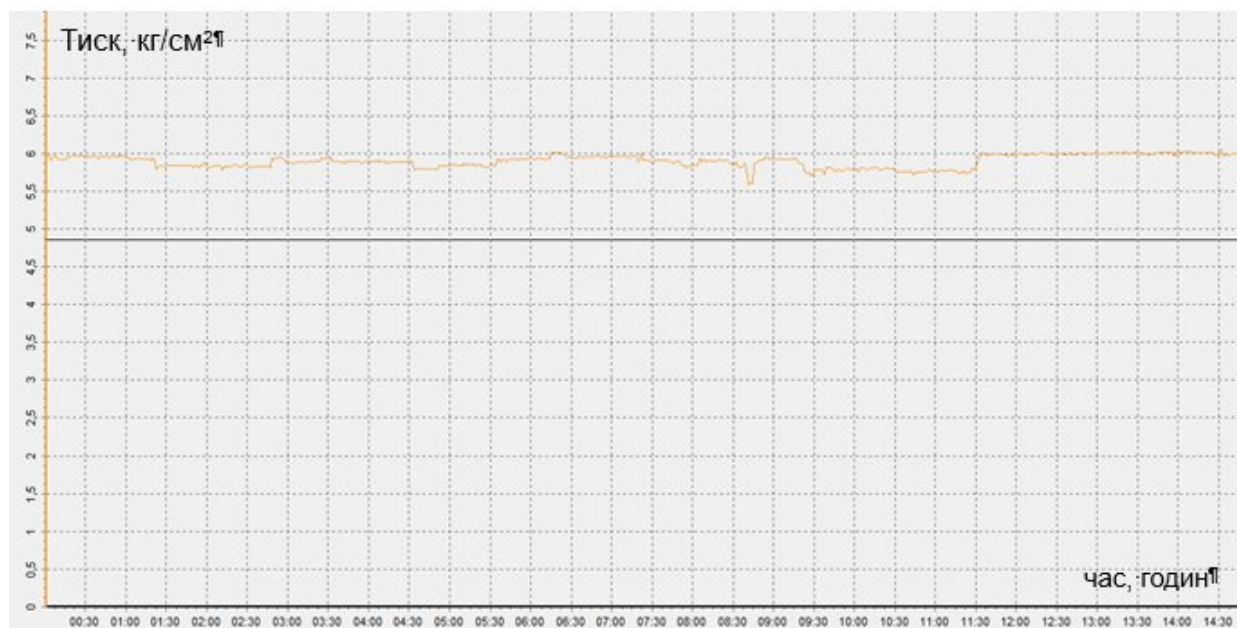



Рисунок 3.1 – Графік тиску протягом певного часу



Застосування частотного перетворювача дає можливість регулювати швидкість обертання електродвигуна відповідно до фактичних потреб технологічного процесу. Для визначення необхідної швидкості обертання використовується закон подібності насосів, згідно з яким відношення створюваних напорів пропорційне квадрату відношення частот обертання робочого колеса:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2, \quad (3.2)$$

де: P_1 та P_2 – початковий і кінцевий тиски,

N_1 та N_2 – початкова і кінцева швидкості обертання.

Це означає, що для зниження тиску з 6 кг/см² до 5 кг/см² необхідно зменшити швидкість обертання електродвигуна приблизно на 10 %. Зменшення частоти обертання дозволяє суттєво скоротити споживання електричної енергії, що є однією з головних переваг використання частотного перетворювача.

Для оцінки економії електроенергії застосовуються закони подібності насосів, які встановлюють залежність між частотою обертання робочого колеса та споживаною потужністю. Згідно з цими законами, потужність насосного агрегату пропорційна кубу швидкості обертання, тому навіть незначне зменшення частоти обертання забезпечує помітне зниження енергоспоживання. Відповідна залежність визначається за формулою:

$$P_{\text{нов}} = P_{\text{поч}} \cdot \left(\frac{N_{\text{нов}}}{N_{\text{поч}}}\right)^3, \quad (3.3)$$

Отже, зменшення частоти обертання електродвигуна на 10 % забезпечує скорочення споживаної потужності приблизно на 27 %. Такий ефект пояснюється кубічною залежністю потужності насосного агрегату від швидкості обертання робочого колеса. У результаті знижується як механічне навантаження на насос, так і електрична потужність, що споживається двигуном.

За результатами розрахунків споживана потужність електродвигуна після впровадження частотного регулювання становить 182,5 кВт. Тоді річне споживання електричної енергії визначається за формулою (4.1):

$$E_2 = 182,5 \cdot 10^3 \cdot 8766 = 1599795 \text{ кВт}.$$

Економія електроенергії за рік складе:

$$E_e = E_1 - E_2, \quad (3.4)$$

$$E_e = 2191500 - 1599795 = 591705 \text{ кВт}.$$

3.2 Економічний розрахунок

Для оцінки економічної доцільності модернізації насосної станції із впровадженням частотного перетворювача, а також датчиків тиску та частоти обертання необхідно врахувати капітальні витрати на придбання й монтаж обладнання, витрати на експлуатацію та обслуговування, очікувану економію електричної енергії, амортизаційні відрахування та термін окупності проєкту. Аналіз цих показників дозволяє визначити ефективність запропонованого технічного рішення та оцінити його економічний ефект. У таблиці 3.1 наведено орієнтовну вартість необхідного обладнання та робіт з його впровадження.

Таблиця 3.1 – Кошторис витрат на обладнання та монтажні роботи

| Найменування | Вартість |
|-----------------------------|-------------------------|
| Частотний перетворювач (ЧП) | 1700000 грн |
| Енкодер Koyo TRD-S Series | 8000 грн |
| Монтажні роботи і матеріали | 500000 грн |
| Вартість електроенергії | 6,93 грн/кВт |
| Датчик тиску Сафір М 5151 | використовуємо існуючий |

Загальні початкові витрати на модернізацію насосної станції мартенівського цеху визначаються як сума всіх витрат, пов'язаних із придбанням обладнання, виконанням монтажних і налагоджувальних робіт, а також введенням системи в експлуатацію. Загальна вартість модернізації становить:

$$V_{\text{поч}} = \text{ЧП} + E + C_{\text{монт}}, \quad (3.5)$$

де $V_{\text{поч}}$ – початкові витрати,
ЧП – вартість частотного перетворювача,
E – вартість енкодера,
 $C_{\text{монт}}$ – сума витрат за монтажні роботи та матеріали.


$$V_{\text{поч}} = 1700000 + 8000 + 500000 = 2208000 \text{ грн.}$$

Вартість зекономленої електроенергії буде дорівнювати:

$$V_{\text{з.ел.ен.}} = E_e \cdot C_{\text{ел.ен.}}, \quad (3.6)$$

де $C_{\text{ел.ен.}}$ – вартість електроенергії

$$V_{\text{з.ел.ен.}} = 600000 \cdot 6,93 = 4185000 \text{ грн.}$$



Чистий прибуток буде дорівнювати:

$$\Pi = V_{з.ел.ен.} - V_{поч}, \quad (3.7)$$

$$\Pi = 4185000 - 220800 = 1\,950\,000 \text{ грн.}$$

Індекс доходності буде дорівнювати:

$$PI = \frac{V_{з.ел.ен.}}{V_{поч}}, \quad (3.8)$$

$$PI = \frac{4\,185\,000}{2\,208\,000} = 1,9$$

Для розрахунку періоду окупності використовуємо формулу:

$$PP = \frac{V_{поч}}{V_{з.ел.ен.}}, \quad (3.9)$$

$$PP = \frac{2208000}{4185000} = 0.53 \text{ роки.}$$

Результати економічних розрахунків для зручності аналізу та порівняння узагальнено й наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати економічного розрахунку

| | |
|--|---------------|
| Економія електроенергії за рік (E_e) | 600 000 кВт |
| Вартість зекономленої електроенергії за рік ($V_{з.ел.ен.}$) | 4 185 000 грн |
| Початкові витрати ($V_{поч}$) | 2 208 000 грн |
| Чистий прибуток (Π) | 1 950 000 грн |
| Індекс доходності (PI) | 1,9 |
| Період окупності (PP) | 0.53 роки |

Проведені розрахунки підтверджують економічну доцільність модернізації насосної станції шляхом впровадження частотного перетворювача. Проєкт характеризується високою рентабельністю та коротким терміном окупності завдяки суттєвому зниженню споживання електричної енергії. Отримана економія дозволяє у стислі терміни компенсувати початкові інвестиції, а в подальшому забезпечує стабільний економічний ефект. Реалізація запропонованого рішення сприятиме підвищенню енергоефективності, надійності та економічності роботи насосної станції.

4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпек при експлуатації електромеханічного обладнання


Експлуатація електромеханічного обладнання насосної станції високого тиску мартенівського цеху пов'язана з впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть становити загрозу для життя та здоров'я обслуговуючого персоналу. До цієї категорії відносяться електричні, механічні, гідравлічні, теплові фактори, а також шум і вібрація, характерні для умов металургійного виробництва.

Особливістю даного об'єкта є використання асинхронних електродвигунів напругою 380 В потужністю 250 кВт, які працюють у складі насосних агрегатів високого тиску. Незважаючи на те, що напруга 380 В належить до низьковольтного рівня, вона є потенційно небезпечною для людини, оскільки струми, що протікають через тіло при випадковому контакті, можуть досягати значень, небезпечних для життя. Ситуація ускладнюється умовами експлуатації, такими як підвищена вологість, температура та запиленість повітря, що сприяє зниженню електричного опору ізоляції та підвищує ймовірність ураження електричним струмом.

Основною небезпекою при експлуатації електрообладнання є можливість ураження електричним струмом. Така небезпека виникає у випадках прямого або непрямого дотику до струмоведучих частин, при пошкодженні ізоляції кабелів, а також у разі появи напруги на металевих частинах обладнання внаслідок пробоя ізоляції. Особливо небезпечними є режими пуску електродвигунів, при яких виникають значні пускові струми, що можуть перевищувати номінальні у декілька разів. Це призводить до підвищених електродинамічних зусиль, нагріву елементів електричної мережі та збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій.

Не менш важливим є вплив механічних небезпечних факторів, пов'язаних з роботою насосного обладнання. Насосні агрегати містять обертові частини, такі як вали, муфти та робочі колеса, які під час роботи мають значну кінетичну енергію. У разі порушення правил експлуатації або відсутності захисних огорожень існує ризик травмування персоналу внаслідок захоплення одягу, удару або контакту з рухомими частинами. Крім того, при прямому пуску електродвигунів виникають значні динамічні навантаження, які можуть спричинити вібрації та руйнування механічних елементів.

Значну небезпеку становлять також гідравлічні фактори, пов'язані з роботою насосів високого тиску. Робота системи при тиску до 7,5 кг/см² створює ризик виникнення гідроударів, які можуть виникати при різкому пуску або зупинці насосів. Гідроудари можуть призводити до пошкодження трубопроводів, арматури та насосного обладнання, що в свою чергу створює небезпеку для персоналу через можливі викиди рідини під тиском.



В процесі роботи електродвигуни та силове електрообладнання виділяють значну кількість тепла. Недостатнє охолодження або перевантаження можуть призводити до перегріву обмоток, погіршення ізоляційних властивостей матеріалів і, як наслідок, до виникнення аварійних ситуацій або пожеж. Таким чином, теплові фактори також є важливою складовою загального рівня небезпеки.

Окрім зазначених факторів, робота насосного обладнання супроводжується підвищеним рівнем шуму та вібрацій. Тривалий вплив цих факторів може призводити до погіршення стану здоров'я персоналу, зокрема до зниження слуху, підвищеної втомлюваності та зниження концентрації уваги, що опосередковано підвищує ризик травматизму.

Пожежна небезпека є ще одним важливим аспектом при експлуатації електромеханічного обладнання. Причинами виникнення пожеж можуть бути короткі замикання, перевантаження електромережі, перегрів електрообладнання або іскріння контактів. Умови металургійного виробництва можуть додатково ускладнювати ситуацію через наявність пилу та підвищених температур.

Таким чином, експлуатація насосної станції високого тиску супроводжується комплексним впливом небезпечних факторів, що вимагає впровадження ефективних технічних та організаційних заходів щодо забезпечення безпеки праці.


4.2 Розробка заходів із захисту персоналу

З метою забезпечення безпечних умов праці при експлуатації електромеханічного обладнання насосної станції необхідно реалізувати комплекс взаємопов'язаних технічних та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків впливу небезпечних факторів.

Першочергове значення має забезпечення електробезпеки персоналу. Для цього необхідно передбачити надійну ізоляцію струмоведучих частин обладнання, що виключає можливість випадкового дотику. Усі металеві неструмоведучі частини електрообладнання повинні бути заземлені, що забезпечує відведення струму у разі пошкодження ізоляції та запобігає появі небезпечної напруги на корпусах. Важливим заходом є застосування автоматичних вимикачів та інших засобів захисту, які забезпечують швидке відключення живлення при виникненні коротких замикань або перевантажень.

Особлива увага повинна приділятися безпечному виконанню ремонтних і налагоджувальних робіт. Перед початком таких робіт необхідно виконати повне відключення обладнання від мережі, перевірити відсутність напруги та вжити заходів, що унеможливають випадкове повторне включення. Організаційні заходи повинні передбачати допуск до роботи лише кваліфікованого персоналу, який пройшов відповідне навчання та інструктаж з охорони праці.

Зниження рівня механічної небезпеки досягається шляхом встановлення захисних огорожень на всі обертові частини обладнання,



а також забезпечення їх справного технічного стану. Регулярне технічне обслуговування насосних агрегатів дозволяє своєчасно виявляти та усувати дефекти, що можуть призвести до аварійних ситуацій.

Для зменшення впливу гідравлічних факторів доцільно застосовувати технічні рішення, що забезпечують плавний пуск і зупинку насосів. Використання частотного перетворювача в модернізованій системі дозволяє уникнути різких змін швидкості обертання електродвигунів, що суттєво знижує ймовірність виникнення гідрударів. Додатково необхідно передбачити встановлення запобіжних клапанів та систем контролю тиску.

Захист від теплових факторів забезпечується організацією ефективної вентиляції приміщення, а також контролем температурного режиму роботи електрообладнання. Використання температурних датчиків і систем автоматичного відключення дозволяє запобігти перегріву та аваріям.

Зниження рівня шуму і вібрацій досягається шляхом застосування віброізолюючих конструкцій, балансування обертових частин і дотримання правил монтажу обладнання. У разі необхідності персонал повинен використовувати засоби індивідуального захисту.

Пожежна безпека забезпечується шляхом застосування захисної апаратури, що запобігає коротким замиканням і перевантаженням, використанням вогнестійких матеріалів, а також наявністю первинних засобів пожежогасіння. Регулярний контроль стану електрообладнання та кабельних ліній дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні дефекти.

Важливу роль у забезпеченні безпеки праці відіграють організаційні заходи, до яких належать проведення інструктажів, навчання персоналу, контроль за дотриманням правил експлуатації та періодична перевірка знань працівників.

Таким чином, реалізація комплексу зазначених заходів дозволяє суттєво знизити ризик травматизму та аварій при експлуатації насосної станції. Впровадження частотного перетворювача, окрім підвищення енергоефективності, сприяє також покращенню умов безпеки за рахунок зменшення пускових струмів, механічних навантажень та гідравлічних ударів, що є важливим фактором для сучасних промислових систем.



ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі виконано комплексне науково-технічне обґрунтування та розробку інженерних рішень щодо модернізації системи пуску й автоматичного регулювання кутової швидкості високовольтних електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху на основі впровадження статичного перетворювача частоти. На основі проведених теоретичних, експериментальних та економічних досліджень сформувано такі висновки:

Актуальність та обґрунтованість модернізації. Комплексний аудит чинного електротехнічного комплексу підтвердив, що перехід від морально застарілих пускових контурів прямого включення до частотно-регульованого привода є критично необхідним кроком. В умовах сучасних макроекономічних викликів, жорсткого дефіциту маневрових потужностей та деструктивного стану енергетичної інфраструктури України, розроблені заходи є безальтернативним інструментом кардинального зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у металургійному секторі.


Теоретична верифікація. Проведені теоретичні дослідження законів регулювання напруги та магнітного потоку асинхронних машин змінного струму підтвердили високу ефективність напівпровідникових інверторів при роботі на вентиляторне (квадратичне) навантаження. Реалізація закону частотного керування $U/f^2 = \text{const}$ дозволяє оптимізувати електромагнітний момент двигуна, забезпечити плавність пускових режимів і гарантувати динамічну стійкість гідросистеми охолодження мартенівських печей у важких умовах експлуатації.

Експериментальне підтвердження. Сформована методика натурних експериментів із розгортанням вимірювального комплексу на базі інкрементального енкодера *Koyo TRD-S Series* та інтелектуального первинного перетворювача тиску *Saфip M 5151* дозволила верифікувати математичні моделі подібності лопатевих гідромашин. Експериментально доведено, що зниження робочої частоти живильного струму статора всього на 10% (від базових 50 Гц до 45 Гц) за рахунок кубічної залежності потужності від швидкості призводить до зменшення енергоспоживання агрегату орієнтовно на 27%.

Техніко-економічна доцільність. Розрахунок інтегральних показників фінансової ефективності проекту підтвердив високу швидкість повернення інвестицій та капіталомістку рентабельність впроваджуваних засобів силової електроніки:

- загальний обсяг капітальних першочергових вкладень у модернізацію (придбання ПЧ, датчиків, КВПіА та пусконаладжувальні роботи) становить 2 208 000 грн;

- річний обсяг згенерованої економії активної електричної енергії складає 591 705 кВт·год, що у грошовому еквіваленті дорівнює 4 185 000 грн;


- 
- чистий фінансовий прибуток (ефект) від реалізації проекту зафіксовано на рівні 1 950 000 грн;
 - дисконтований період окупності інвестованого капіталу становить всього 0,53 року (приблизно 6,3 місяця).

Практична цінність. Сформовані у кваліфікаційній праці інженерні рекомендації щодо параметрування контурів зворотного зв'язку, захисного екранування кабельних трас та організації системи заземлення для забезпечення вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) мають універсальний характер. Розроблені технічні алгоритми можуть бути успішно екстрапольовані на аналогічні насосні комплекси промислових підприємств важкої індустрії з метою підвищення їхньої загальної надійності, безвідмовності та пролонгації міжремонтного інтервалу технологічного обладнання.



ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костенко М. П., Піотровський Л. М. Електричні машини. Частина 2. Машини змінного струму. Харків : Основа, 2011. 528 с.
2. Руденко В. С., Ромашко В. Я., Морозов Ю. В. Промислова електронна техніка та силова електроніка : підручник. Київ : Вища школа, 2008. 456 с.
3. Возняк О. М., Штуць А. А., Колісник М. А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1 : навч. посіб. Вінниця : ТВОРИ, 2021. 280 с.
4. Охота К. А. Адаптивна система керування продуктивністю насосної станції подачі води на збагачувальну фабрику. Вісник Криворізького національного університету. 2016. № 42. С. 208–212.
5. Соколова К. А. Принцип роботи частотного перетворювача. Automation Technological and Business-Processes. 2014. Т. 15, № 15-16. С. 25–30
6. Пирогов В. О. Модернізація привода насосних станцій трубопроводів. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 2022. № 1(52). С. 50–56.
7. Муравльова О. О. Енергозбереження насосного агрегату при використанні асинхронного регульованого електропривода. Промислова електроенергетика та електротехніка. 2007. № 3. С. 467–470.
8. Bilynsky Y. Y., Burdeinyi V. B. Investigation of the Opportunity to Develop a Phase-Frequency Ultrasonic Measuring Converter for the Speed of Natural Gas Flow in Closed Small Diameter Pipeline. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute. 2019. Vol. 146, no. 5. P. 7–13.
9. Kutsyk A., Semeniuk M., Podskarbi G. Dual-motor induction frequency-regulated electric drive with improved electromagnetic and electromechanical compatibility. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2022. № 1 (5). P. 24–35.
10. Холодько С. Г. Оптимізація системи автоматичного керування насосної станції. Інформатика, математика, автоматика : матеріали та програма наук.-техн. конф. (м. Суми, 18–22 квітня 2016 р.). Суми, 2016. С. 149.
11. Холодько С. Г. Оптимізована система керування насосної станції водопостачання житлового будинку. Інформатика, математика, автоматика : матеріали та програма наук.-техн. конф. (м. Суми, 17–21 квітня 2017 р.). Суми, 2017. С. 141.
12. Коротаєв П. О. Енергоефективний електропривод насосного агрегату з покращеними пусковими характеристиками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2016. 20 с.
13. Ковальова Ю. В. Компенсація реактивної потужності електроприводів з тиристорними перетворювачами напруги : дис. ... канд.



техн. наук : 05.09.03 / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків, 2016. 157 с.

14. Сарняк І. М. Розробка автоматизованої системи управління електроприводом для постачання води приватним житловим господарствам : дипломна робота магістра / Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль : ТНТУ, 2020. 72 с.

15. Михайленко Ю. І. Підвищення ефективності електроспоживання технологічного обладнання промислового підприємства : кваліфікаційна робота бакалавра / наук. керівник С. В. Башлій ; Запорізький національний університет. Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 63 с.

16. Лобов Р. В. Дослідження шляхів підвищення енергоефективності технологічного обладнання підприємства водопостачання : кваліфікаційна робота магістра / наук. керівник О. І. Осаул ; Запорізький національний університет. Запоріжжя : ЗНУ, 2022. 75 с.

17. Автоматична насосна станція : пат. 133016 Україна : МПК F04B 49/00. № u 2018 09125 ; заявл. 04.09.2018 ; опубл. 25.03.2019, Бюл. № 6.

18. Спосіб захисту асинхронного електродвигуна з живленням від перетворювача частоти : пат. 129616 Україна : МПК H02H 7/08. № u 2018 03696 ; заявл. 06.04.2018 ; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.

19. High pressure manifold, assembly, system and method : patent 10768642 US : МПК F16L 41/00. MGB Oilfield Solutions, L.L.C. № 15/962,814 ; заявл. 25.04.2018 ; опубл. 08.09.2020.

