МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Дослідження та вдосконалення роботи електропривода мережевого насосу котельні

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1414
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Є. В. Штанько
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф., Биковський О.Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент д.т.н., проф., Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва)

Спеціалізація _____

(код та назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф. _____ В.Л. Коваленко
«_____» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Штанько Єгор Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Дослідження та вдосконалення роботи електропривода мережевого насосу котельні

керівник роботи Биковський О.Г., д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «27» 02 2025 року № 313 - с

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом мережевого насоса

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз існуючого електрообладнання котельні 2) Модернізація та дослідження динамічних властивостей електроприводу насоса 3) Охорона праці та захист навколишнього середовища: аналіз умов праці та пожежної безпеки 4) Економічна частина: характеристика об'єкта проєктування; проєктні рішення; розрахунок потреби в інвестиціях; розрахунок собівартості продукції й економічної ефективності проєктних рішень.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) постановка задачі дослідження; 2) схема після модернізації; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) техніко-економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Биковський О.Г., д.т.н., професор		
Розділ 2	Биковський О.Г., д.т.н., професор		
Розділ 3	Биковський О.Г., д.т.н., професор		
Розділ 4	Биковський О.Г., д.т.н., професор		

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого електрообладнання котельні	30.09.2025	
2	Модернізація та дослідження динамічних властивостей електроприводу мережевого насоса	15.10.2025	
3	Охорона праці та захист навколишнього середовища	25.11.2025	
4	Економічна частина	30. 11.2025	

Студент _____ Є. В. Штанько
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.Г. Биковський
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Штанько Єгор Вікторович. Дослідження та вдосконалення роботи електропривода мережевого насосу котельні.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Биковський О.Г. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

Об'єкт модернізації – система керування електропривода мережевого насосу, що працює в умовах котельні.

Мета роботи – реконструкція електропривода мережевого насосу шляхом інтеграції в існуючу систему електропривода перетворювача частоти.

Метод дослідження та засоби – дослідження електропривода мережевого насосу із застосуванням програмного продукту Mathcad 14 та Matlab 5.0

Магістерська робота присвячена комплексному аналізу та модернізації системи електропривода мережевого насоса 1-Д200-90, що використовується у теплових мережах котельні для перекачування гарячої води. Актуальність дослідження обумовлена значною часткою електроенергії, яку споживають насосні агрегати в комунальній енергетиці, а також необхідністю зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності системи в умовах сучасної енергетичної ситуації. У вступній частині проаналізовано проблеми, характерні для нерегульованих насосних установок: кавітаційні режими, гідравлічні удари, надлишкові втрати енергії при дроселюванні потоку, підвищене навантаження на трубопровідні системи та низька гнучкість керування режимами роботи. Показано, що традиційні методи регулювання продуктивності насоса не

забезпечують енергоефективного функціонування і призводять до передчасного зносу обладнання.

У роботі виконано детальний аналіз конструктивних, гідравлічних та електромеханічних характеристик насоса 1-Д200-90 і приводного асинхронного двигуна 4АН280S2У3 потужністю 160 кВт, встановленого у складі насосної станції. На основі каталогових даних і нормативних залежностей визначено основні параметри насоса, включаючи напор, подачу, кавітаційний запас та характер зміни навантаження залежно від швидкості обертання. Проведено розрахунок потужності електродвигуна з урахуванням запасів та можливих відхилень у роботі агрегату. Розроблено математичні моделі механічної характеристики електродвигуна та моментної характеристики насоса, виконано їх порівняння та побудовано спільну механічну характеристику системи «двигун–насос». Це дозволило виявити особливості навантаження електропривода при зміні технологічних параметрів і оцінити можливі режими роботи.

На основі проведених розрахунків обґрунтовано доцільність застосування частотно-регульованого електропривода як засобу підвищення енергоефективності та забезпечення оптимального режиму роботи насосної установки. Проаналізовано сучасні підходи до регулювання швидкості асинхронних двигунів, зокрема скалярні та векторні методи керування, а також розглянуто стандарти енергоефективності IEC 60034-30, що регламентують класи енергоощадних електродвигунів. У роботі сформовано технічне рішення щодо інтеграції перетворювача частоти у систему керування насосом, що включає вибір обладнання, розробку алгоритмів захисту та логіки керування, а також гарантує безпечний запуск і зупинку агрегату без виникнення гідроударів.

Запропоновано універсальний енергозберігаючий алгоритм керування асинхронним електроприводом, який забезпечує узгодження робочих параметрів насоса з реальними технологічними навантаженнями, запобігає піковим

перевантаженням, мінімізує втрати електроенергії та продовжує ресурс механічних елементів установки. У рамках дослідження виконано моделювання перехідних процесів пуску двигуна при скалярному керуванні та при прямому підключенні. Показано, що використання перетворювача частоти забезпечує значне зниження пускового струму, плавніший вихід на номінальний режим і зменшення механічних ударних навантажень. Отримані результати доводять, що впровадження частотно-регульованого електропривода дозволяє скоротити споживання електроенергії насосною станцією на 30–50 %, підвищити надійність роботи системи та зменшити експлуатаційні витрати.

Результати магістерської роботи можуть бути впроваджені в системах водопостачання, теплопостачання, на промислових та комунальних об’єктах, де використовуються насосні агрегати великої потужності. Розроблені рекомендації щодо модернізації електропривода є універсальними та можуть бути застосовані при проєктуванні нових енергоефективних систем або реконструкції існуючих насосних станцій.

Ключові слова: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, система керування, програмований логічний контролер, безконтактні елементи, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, насос.

ABSTRACT

Shtanko Yehor Viktorovych. Research and Improvement of the Electric Drive of the Boiler House Network Pump.

Master's qualification work for obtaining the higher education degree of Master in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Scientific supervisor: Bykovskyi O.H. Zaporizhzhia National University, Yu.M. Potebnia Educational and Scientific Institute of Engineering, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

Object of modernization: the control system of the electric drive of a network pump operating under boiler house conditions.

Purpose of the work: reconstruction of the electric drive of the network pump by integrating a frequency converter into the existing drive system.

Research methods and tools: investigation of the electric drive of the network pump using Mathcad 14 and Matlab 5.0 software.

The master's thesis is devoted to a comprehensive analysis and modernization of the electric drive system of the 1-D200-90 network pump, which is used in the heating networks of a boiler house for hot-water circulation. The relevance of the research is determined by the significant share of electrical energy consumed by pumping units in municipal energy systems, as well as the need to reduce operating costs and increase system reliability under current energy conditions. The introductory section presents an analysis of typical problems inherent to uncontrolled network pump systems: cavitation modes, hydraulic shocks, excessive energy losses during throttling, increased load on pipeline systems, and insufficient flexibility of operating mode control. It is shown that traditional methods of pump performance regulation do not provide energy-efficient operation and lead to premature equipment wear.

The work includes a detailed analysis of the structural, hydraulic and electromechanical characteristics of the 1-D200-90 pump and the 4AH280S2U3 induction motor (160 kW) used as the drive unit. Based on catalog data and normative dependencies, the main pump parameters were determined, including head, flow rate, cavitation margin, and the nature of load changes depending on rotational speed. The motor power was calculated taking into account safety margins and possible deviations in pump operation. Mathematical models of the mechanical characteristic of the induction motor and the torque characteristic of the pump were developed, compared, and used to construct a combined mechanical characteristic of the "motor–pump" system. This enabled identifying the features of the electric drive load under varying technological conditions and evaluating possible operating modes.

Based on the analytical results, the expediency of implementing a variable-frequency electric drive as a means of improving energy efficiency and ensuring optimal pump operation is substantiated. Modern approaches to controlling the speed of induction motors, including scalar and vector control methods, are analyzed, as well as IEC 60034-30 efficiency standards regulating energy-efficient motor classes. The thesis presents a technical solution for integrating a frequency converter into the pump control system, including equipment selection, development of protection algorithms and control logic, ensuring safe start-up and shutdown without hydraulic shocks.

A universal energy-saving control algorithm for the induction electric drive is proposed. It ensures the coordination of pump operating parameters with real technological loads, prevents peak overloads, minimizes electrical energy losses, and increases the service life of mechanical components. Simulation of transient start-up processes using scalar control and direct-on-line starting was performed. The results show that the use of a frequency converter significantly reduces starting current, ensures smoother acceleration to nominal speed, and decreases mechanical impact loads. The obtained results confirm that the implementation of a frequency-controlled electric

drive can reduce the electrical energy consumption of the pumping station by 30–50 %, increase system reliability, and decrease operational costs.

The results of the master's thesis can be applied in water supply and heating systems, as well as in industrial and municipal facilities that use high-power pumping units. The developed recommendations on electric drive modernization are universal and may be applied both for new energy-efficient system design and for reconstruction of existing pumping stations.

Keywords: squirrel-cage induction motor, control system, programmable logic controller, solid-state devices, efficiency factor, power factor, pump.

ЗМІСТ

ВСТУП…….....12
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА…….....15
1.1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод мережевого насосу …….....15
1.2 Основні технічні характеристики насосу……15
1.3 Опис роботи схеми електричної принципової насоса…….....17
1.4 Щодо доцільності модернізації електроприводів мережевих насосів…….19
1.5 Регульований електропривід як засіб підвищення ефективності виробництва……26
1.5.1 Загальні питання……26
1.5.2 Ефективність використання обладнання з регульованим електроприводом……33
1.5.3 Витрати на техобслуговування……34
1.6 Основні шляхи модернізації електропривода насосу та формування вихідних даних……35
2 ІННОВАЦІЙНО – ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА……..37
2.1 Розрахунок потужності двигуна…….37
2.2 Розрахунок основних параметрів двигуна і виробничого механізму……38
2.2.1 Побудова механічних характеристик двигуна і виробничого механізму……38
2.2.2 Визначення часу пуску і гальмування двигуна і побудова характеристик розгону і гальмування……42
2.2.3 Побудова кривих нагріву і охолодження двигуна ……44

2.3 Вибір приводного двигуна……46
2.4. Розрахункові параметри електродвигуна……47
2.5 Визначення параметрів схеми заміщення…….48
2.6 Вибір перетворювача частоти……51
2.6.1 Оцінка надійності модернізованого електропривода……...53
2.7 Моделювання системи……56
2.7.1 Складання математичної моделі електропривода……..56
2.7.2 Синтез математичної моделі векторної системи керування ПЧ……63
2.8.Енергозбереження ……69
2.8.1 Загальні відомості…….69
2.8.2 Компенсація реактивної потужності……..70
2.8.3 Засоби компенсації реактивної потужності……71
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА……..72
3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки……72
3.2 Заходи поліпшення умов праці……...80
3.2.1 Розрахунок захисного заземлення…….80
3.3 Охорона навколишнього середовища……82
4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА……..85
4.1 Характеристика об'єкта модернізації……85
4.2 Розрахунок теплової схеми котельні у зимовий період……85
4.3 Розрахунок теплової схеми котельні в середньоопалювальному періоді……..87
4.4 Розрахунок техніко-економічних показників котельні…….90
ВИСНОВКИ……94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..96

ВСТУП

Основними споживачами електроенергії в нашій країні є виробничі підприємства і об'єкти ЖКХ. Велика частина електроенергії споживається електроприводами насосів і вентиляторів. Вартість електроенергії в загальній сумі експлуатаційних витрат на водопровідно-каналізаційних підприємствах у разі використання поверхневих вод складає 40-50%. При використанні підземних вод цей показник збільшується до 70-80%. Як показує статистика, в процесі перекачування чистих і стічних вод нераціонально витрачається 5-15% енергій. В окремих випадках цей показник зростає до 20-50% [1].

Насосним агрегатом називається насос з електроприводом і передатним механізмом (муфтою, редуктором, шківом). В сукупності з устаткуванням, що забезпечує його роботу в необхідному режимі, він утворює насосну установку. Споруда, до складу якої входять одна або декілька насосних установок і допоміжні системи, що забезпечують працездатність об'єкту в цілому, називається насосною станцією.

В умовах недостатнього вхідного тиску насос переходить у режим кавітації, який є одним із найнебезпечніших експлуатаційних станів для відцентрових насосних агрегатів. Кавітація виникає тоді, коли тиск на вході в робоче колесо знижується до значення, нижчого за тиск насиченої пари рідини. У таких умовах у потоці утворюються парогазові пухирці, що переносяться до області підвищеного тиску, де вони різко руйнуються. Процес мікровибухів кавітаційних бульбашок супроводжується локальними ударними навантаженнями надзвичайно високої інтенсивності, які багаторазово перевищують робочий тиск у системі. Саме ці імпульсні навантаження призводять до прогресивної ерозії поверхонь: спочатку зменшується ресурс вузлів, далі відбувається відшарування матеріалу, утворення каверн, тріщин, а згодом — руйнування робочого колеса та внутрішніх стінок корпусу насоса. Тривала експлуатація обладнання в умовах кавітації може призвести не лише до втрати продуктивності та зростання енерговитрат, а й до повного виходу насоса з ладу.

При виході робочої точки насоса за межі допустимої робочої області може виникнути інше небезпечне явище — помпаж. Помпаж є нестійким гідродинамічним режимом, за якого подача та натиск насоса починають коливатися, а робоча характеристика набуває циклічного характеру. У цьому режимі потік рідини періодично змінює напрям або швидкість, що призводить до пульсацій тиску у всій системі. Такі коливання спричиняють нерівномірне навантаження на насосний агрегат, що переходить у фазу нестабільної роботи: відбуваються механічні вібрації, гідравлічні удари, підвищується шум, збільшується динамічний вплив на трубопровідну арматуру та кріплення. Наявність помпажу суттєво знижує надійність системи, прискорює знос підшипникових вузлів, муфт та інших елементів, а в окремих випадках може призвести до аварійної зупинки обладнання.

Таким чином, як кавітація, так і помпаж є критичними явищами, що суттєво впливають на працездатність, довговічність та безпеку роботи насосних установок. Їх виникнення потребує негайного коригування режимів роботи — шляхом стабілізації вхідного тиску, зміни частоти обертання, регулювання гідравлічного навантаження або впровадження засобів автоматизованого контролю параметрів потоку.

Далеко не завжди можна підібрати насосний агрегат, який зможе забезпечити необхідну витрату рідини при заданому тиску. Найпростіше підібрати насос, який із запасом може виконати поставлене завдання, а «надлишки», що вийшли, абикуди скинути. Найпростіший спосіб — закільцювати вихід насоса з його входом і встановити перепускний вентиль, який регулюватиме потік зворотної води. Споживання електроенергії електроприводом в цьому випадку абсолютно не залежить від продуктивності насоса.

Можлива періодична робота насосного агрегату при управлінні в старт-стопному режимі на демпфуючий пристрій, що забезпечує підтримку необхідного технологічного параметра. Воно компенсуватиме кидки і провали потоку рідини при пуску і зупинці насоса. Класичним прикладом подібного регулювання є робота водонапірної башти. У зв'язку з тим, що час роботи електродвигуна істотно більше

часу його пуску, можна вважати, що ККД насоса близько до максимального значення.

Число включень-відключень насосних агрегатів при цьому може досягати 40-50 в добу. Для агрегатів великої потужності така кількість включень неприпустима, тому в насосних установках потужністю вище 150 кВт замість цього застосовувалося дроселювання потоку води засувкою (пристроєм, який за рахунок свого механічного переміщення змінює поперечний перетин трубопроводу). При закритті засувки ефективний поперечний переріз трубопроводу зменшується. Внаслідок цього подача води зменшується, а натиск, що розвивається насосом, зростає.

Потужність, споживана електроприводом насоса, для цього способу регулювання також залишається постійною. Її надлишок витрачається на підвищення тиску в трубопроводі вище за розрахункове значення, що приводить до передчасного зносу трубопровідних систем і замочних пристроїв (клапани, крани). Крім того, це є причиною підвищеної витрати води у споживачів і витоків води через стики і щілини.

Є ще одна серйозна проблема, що виникає при включенні-відключенні насосних агрегатів, — гідроудар. Гідроудар — це ударна механічна дія рухомої з високою швидкістю межі розділу рідина — повітря. Він робить вплив на всі частини напірного трубопроводу, що створюють гідравлічний опір (звуження, вигини і розгалуження трубопроводу, засувки і т. п.). Крім того, в трубопроводі є дефекти — тріщини, пори, розшарування, непровари швів, що розростаються при циклічних, корозійних, ерозійних діях, від деформаційного старіння. При відключенні насосного агрегату статичний натиск води закриває зворотний клапан, і швидкість руху стовпа рідини різко падає до нуля. Кінетична енергія нестискуваної води викликає різкий стрибок тиску в напірному трубопроводі і викликає пориви старих ділянок труб і місць їх з'єднань — сполучних муфт, фланців.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ КОТЕЛЬНІ

1.1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод мережевого насосу

Котельня №1 опалює як приміщення навчальних корпусів, бібліотеку, господарчі будівлі, так і житлові будинки. Об’єктом дослідження виступає мережевий насос 1-Д-200-90, який приводиться в рух асинхронним двигуном потужністю 160 кВт.

Для перекачування гарячої води в системах теплових мереж котелень використовуються мережеві насоси. Вони призначені для роботи з носієм, температура якого не перевищує 180°С. Устаткування відрізняється простою конструкцією, високою надійністю і продуктивністю. Вони невибагливі, не вимагають складного обслуговування і характеризуються простим монтажем. Підвищений запас міцності досягається за рахунок застосування в процесі виготовлення проточної частини сірого чавуну і якісної сталі.

Працюють мережеві насоси для котелень з чистою водою, кількість механічних домішок в рідини, яка перекачується не повинна перевищувати 5 мг/л. Максимальний розмір твердих частинок обмежений 0,2 мм. Витримка цих параметрів в процесі водопідготовки допоможе забезпечити багаторічну безаварійну експлуатацію обладнання [2].

1.2 Основні технічні характеристики насосу

Насоси 1-Д200-90 — це одноступінчаті горизонтальні насоси з двосторонньою подачею перекачуваної рідини. Ці насоси можуть використовуватися для перекачування води і будь-якої іншої рідини з

аналогічними фізичними і хімічними властивостями (в'язкість і активність). Привод таких насосів здійснюється електродвигуном.

Максимальна споживана насосом 1 Д200-90 потужність дорівнює 160 кВт.

Насоси з первинним урізанням робочого колеса (1 Д200-90а) мають двигун потужністю 160 кВт, а з вторинною (1 Д200-90б) — 90 кВт.

Габаритні розміри насоса 1Д200-90 наведено на рисунку 1.1.

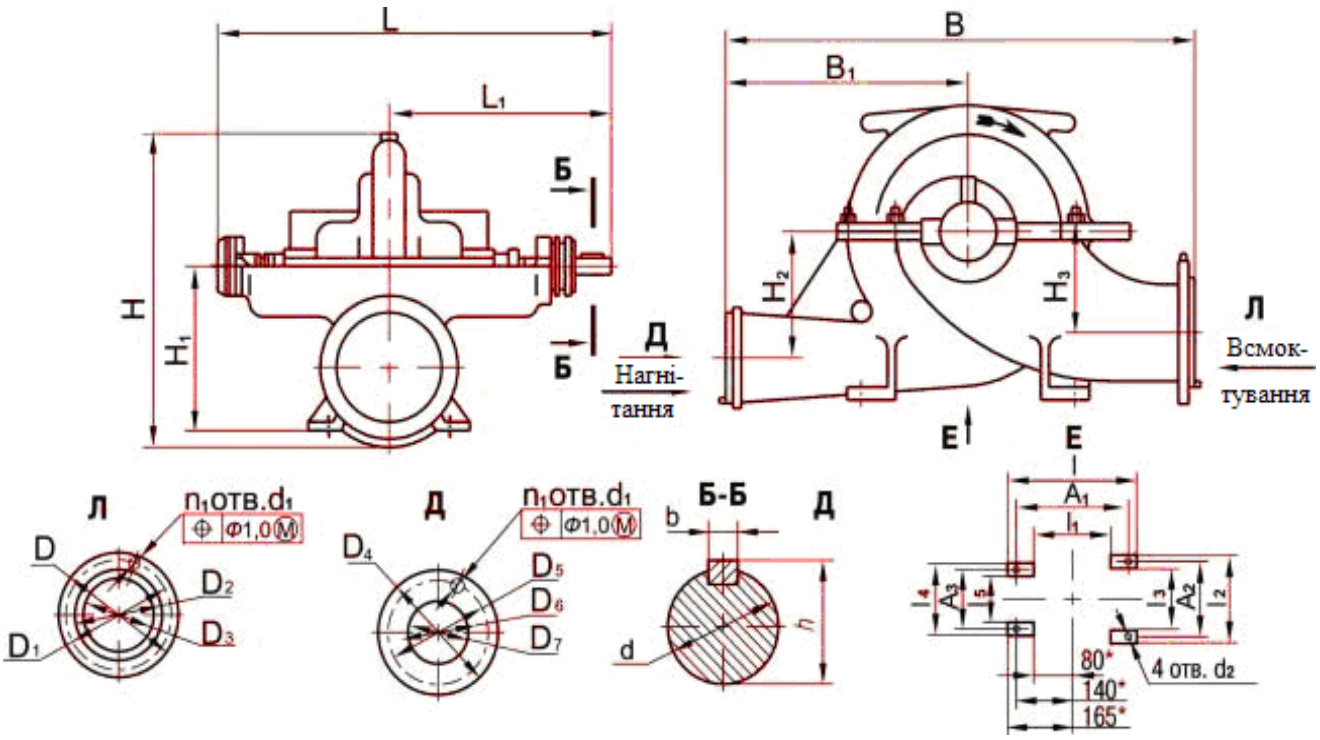


Рисунок 1.1− Габаритні розміри насоса 1Д200-90

Основні розміри насосу наведено в таблицях 1.1 – 1.3.

Таблиця 1.1− Габаритні розміри насоса 1Д200-90

Розміри в мм													
L	L_1	I	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	B	B_1	H	H_1	H_2	H3
766	420	355	165	370	220	250	100	530	250	495	260	170	170

Таблиця 1.2 − Габаритні розміри насоса 1Д200-90

Розміри в мм											
A_1	A_2	A_3	h	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
270±1,1	320±1,1	200±1,1	39-0,29	260	225	202	150	215	180	158	100

Таблиця 1.3− Габаритні розміри насоса 1Д200-90

Розміри в мм							Ру, Мпа (кгс/см^2) вх/вих
d	d_1	d_2	d_3	n	n_1	b	
18	18	24	36js6(±0,008)	8	8	10 N9(-0,036),h9(-0,036)	0,6(6)/1,6(16)

В таблиці 1.4 наведено основні параметри насоса [3].

Таблица 1.4− Технічні параметри насоса 1Д-200-90

Найменування показника	Значення
Подача, м^3/годину	200
Напор, м	90
Частота обертання, об/хв	2900
Припустимий кавітаційний запас, м	3,0
Маса насоса, кг	468

1.3 Опис роботи схеми електричної принципової насоса

Схема електрична принципова основних електроприводу насосу наведена на листі 1 графічної частини роботи та на рисунку 1.2[3].

Насос приводиться в рух асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.

Насос може працювати лише при повністю заповненій гідросистемі в режимі S1 (тривалий) та S3 (повторно-короткочасний).

Запуск насоса без заповнення його гідросистеми рідиною не припустимо, тому в системі передбачено датчик рівня рідини. Для унеможливлення розриву трубопроводу при його забрудненні зазвичай в систему встановлюють датчик тиску.

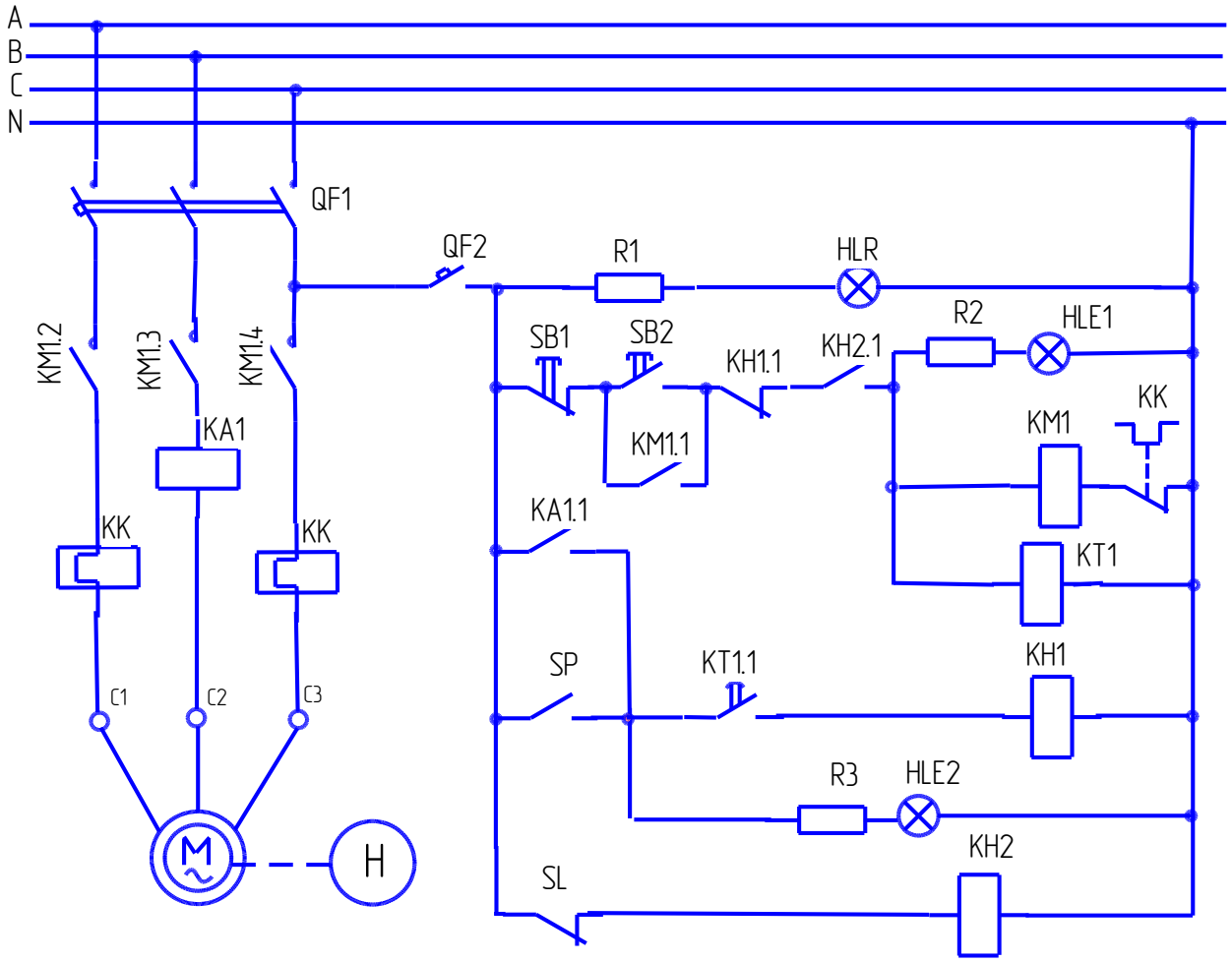


Рисунок 1.2 − Схема електрична принципова електроприводу насосу

В системі керування знаходяться автоматичні вимикачі QF1 та QF2, тумблери SP и SL, реле часу КТ1 та реле максимального струму КА1, сигнальні лампи HLE1, HLE2, HLR.

В таблиці 1.5 наведено характеристики електродвигуна насосу 4АН280S2У3.

Таблиця 1.5 − Характеристики електродвигуна 4АН280S2У3

Позначення	Найменування	Тип	Потужність, кВт	Номінальний струм, А
М	Привод насосу	Електронасос 1-Д200-90	160	322

1.4 Щодо доцільності модернізації електроприводів мережевих насосів

В умовах енергетичної кризи та у зв’язку з ростом цін на електроенергію, а також обмеженими можливостями збільшення потужності енергогенеруючих установок, проблема енергозбереження здобуває особливу актуальність і має велике практичне значення. Оскільки електроприводи споживають більше 60% вироблюваної електроенергії, то підвищення їх енергетичної ефективності є основним резервом енергозбереження.

Більшість нерегульованих електроприводів працюють зі значним недовантаженням, що призводить до великих втрат енергії та зниження коефіцієнта потужності. Широке застосування потужних силових керованих випрямлячів, перетворювачів напруги й частоти для регульованого електроприводу постійного та змінного струму значно загострили проблему забезпечення необхідної якості електроенергії, передовсім коефіцієнта потужності, нелінійних спотворювань напруги та струму, стабільність напруги та ін. Традиційне рішення цієї проблеми за допомогою дорогих пасивних фільтрів є недостатньо ефективним через труднощі настроювання на фіксовану частоту.

В останні роки розвинені країни активно працюють над питаннями енергозбереження, що обумовлено обмеженістю і закінченістю викопної сировини (нафта, вугілля, газ, уран тощо); зростаючим світовим попитом на енергію за рахунок постійного зростання економіки, промисловості і добробуту населення; глобальними змінами клімату із-за збільшення емісії парникових

газів; постійним і часто непередбачуваним зростанням цін на вуглеводні; активною «атомофобію» у багатьох країнах Західної Європи і боротьбою «зелених» проти атомної енергетики, що ще більше загострилися після землетрусу в Японії і аварії на АЕС «Фукусіма» в березні 2011 року.

Аналіз проблеми енергозбереження показав, що більше половини електроенергії, що виробляється в світі, споживають електродвигуни. Тому над їх вдосконаленням працюють всі провідні електротехнічні компанії світу. Це обумовило появу енергоефективних електродвигунів (рис.1.3), які виконують більше роботи на одиницю енергії, ніж аналоги (мають вищий ККД). Вищий ККД означає менше енергоспоживання. Звідси і друга назва – енергоощадний двигун[4].



Рисунок 1.3 - Чинники, що обумовлюють актуальність підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів

До основних енергетичних показників роботи електропривода належать втрати енергії, коефіцієнт корисної дії (ККД) η і коефіцієнт потужності cosφ.

Економічність роботи електропривода у будь-якому режимі характеризується ККД – відношення виконаної механічної роботи до кількості спожитої за цей час електроенергії:

$$\eta_ц = \frac{A_{мех}}{A_{ел}} = \frac{\int_0^{Tц} M_м(t)\omega_м(t)dt}{\int_0^{Tц} Pdt}\ , \qquad (1.1)$$

де $\eta_ц$ – цикловий ККД електропривода; $T_ц$ – тривалість робочого циклу, год; $A_{мех}$, $A_{ел}$ – корисна механічна робота і спожита з мережі електрична енергія, Дж; $M_м$ – момент на валу робочої машини, Н·м; ω – кутова швидкість приводного вала робочої машини, $с^{-1}$; Р – потужність, споживана електроприводом з мережі, Вт.

Якщо відомі значення ККД перетворювача електроенергії η п.ел , двигуна η дв і механічних передач η мех. , то ККД електропривода

$$\eta = \eta_{п.ел}\ \eta_{дв}\ \eta_{мех}. \qquad (1.2)$$

Економічність споживання електроенергії з мережі характеризується коефіцієнтом потужності, який є відношенням активної потужності Р до повної S:

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \qquad (1.3)$$

Європейським союзом розроблений і набув чинності новий стандарт IEC 60034-30, згідно з яким встановлено три класи енергоефективності одношвидкісних трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором (рис.1.4):

- IE1 – стандартний клас енергоефективності, приблизно еквівалентний класу енергоефективності Eff2, що застосовується зараз в Європі;
- IE2 – високий клас енергоефективності, приблизно еквівалентний класу енергоефективності Eff1;

- IE3 – вищий клас енергоефективності, новий клас енергоефективності для Європи.

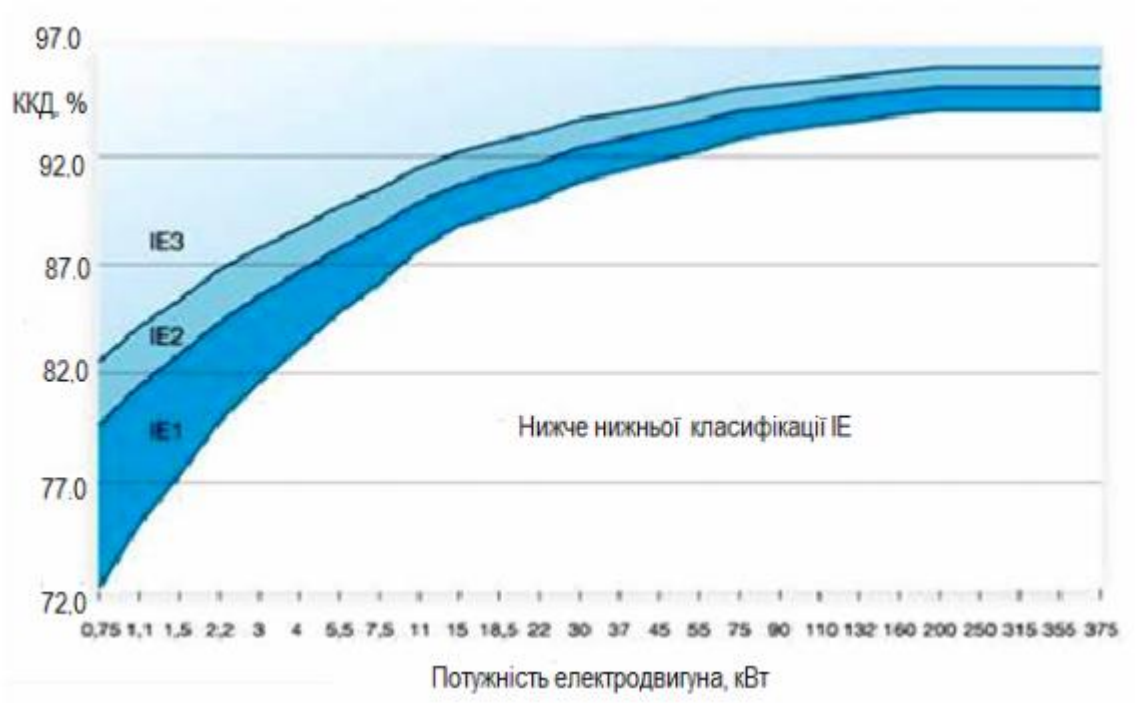


Рисунок 1.4 - Класи енергоефективності асинхронних електродвигунів

Більше того, зараз розробляються вимоги до двигунів класу IE4. За вимогами згаданого стандарту зміни стосуються практично всіх двигунів в діапазоні потужностей від 0,75 кВт до 375 кВт. Очікується, що втрати енергії у порівнянні з класом IE3 знизяться на 15%.

Енергоощадні двигуни – це електродвигуни, ККД яких на 1–10 % вищий, ніж у стандартних двигунів. У потужних енергоощадних двигунах різниця в значеннях ККД складає 1–2 %, а в двигунах малої і середньої потужності – вже 7–10 %.

Підвищення ККД в енергоощадних електродвигунах досягається за рахунок:

- збільшення долі активних матеріалів – міді і сталі;
- використання тоншої і високоякісної електротехнічної сталі;
- застосування замість алюмінію міді в роторних обмотках;
- зменшення повітряного зазору в статорі за допомогою прецизійного технологічного устаткування;

- оптимізації форми зубцевої зони магнітопроводу і конструкції обмоток;
- використання підшипників вищого класу;

У загальному випадку перехід до застосування енергоефективного (енергоощадного) двигуна дозволяє підвищити ККД двигуна на 1–10 % та надійність його роботи; скоротити час простоїв; зменшити витрати на технічне обслуговування; підвищити перевантажувальну здатність двигуна; його стійкість до теплових перевантажень та погіршення експлуатаційних умов (зниженої і завищеної напруги, спотворення форми кривої напруги, перекосу фаз тощо); підвищити коефіцієнт потужності; знизити рівень шуму; збільшити швидкість двигуна за рахунок зменшення ковзання.

Недоліками електродвигунів з підвищеним ККД у порівнянні із звичайними є на 10 – 30 % вища вартість; дещо більша маса; вища величина пускового струму.

Із зростанням енергоефективності збільшується і термін служби двигуна, оскільки втрати в ньому і нагрівання двигуна менші. У деяких випадках використання енергоефективного двигуна є недоцільним:

- коли двигун експлуатується менше 1–2 тис. год/рік;
- при роботі двигуна в режимах з частими пусками, оскільки заощаджена електроенергія буде витрачена на вище значення пускового струму;
- при роботі двигуна з недовантаженням, внаслідок зменшення ККД при роботі на навантаження нижче номінального.

За статистичними даними вартість енергоефективного двигуна складає менше 2 % сумарних витрат на життєвий цикл. Так, якщо двигун працює 4000 годин щороку протягом 10 років, то частка електроенергії становить приблизно 97 % всіх витрат. Тому збільшення ККД двигуна середньої потужності на 2 % дозволить окупити зростання вартості енергоощадного двигуна вже через 3 роки, залежно від режиму роботи.

Освоєння і впровадження електродвигунів високої ефективності усуває проблему необхідності збільшення встановленої потужності електроустаткування і зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу. Крім того, зниження величини шуму і вібрації, збільшення надійності всього електроприводу є безперечним аргументом на користь застосування енергоефективних асинхронних електродвигунів.

Нині освоєний випуск асинхронних короткозамкнених двигуни серії 7А (7AVE), які відносяться до трифазних асинхронних електродвигунів загальнопромислової серії з короткозамкненим ротором. Вони мають ККД на 2 – 4% вищий, ніж в аналогів (EffI). Двигуни випускаються зі стандартним рядом висот осі обертання від 80 до 355 мм, розраховані на потужності від 1 до 500 кВт. Промисловість випускає двигуни зі стандартною частотою обертання 1000, 1500, 3000 об/хв і напругою 220/380, 380/660. Двигуни виконані зі ступенем захисту IP54 й ізоляцією класу F. Допустиме перегрівання відповідає класу В.

До переваг застосування асинхронних двигунів серії 7А відноситься їх висока економічність. Іншою перевагою таких двигунів є їх висока надійність і термін служби, окрім того, у них нижче рівень шуму приблизно в 2–3 рази по відношенню до двигунів попередніх серій. Вони дозволяють виконувати більше число вмикань-вимикань і більш ремонтопридатні. Двигуни можуть працювати при коливаннях напруги мережі до 10 %.

В електродвигунах серії 7А використовується обмотка нового виду, яку можна намотати на обмотувальному устаткуванні старого покоління. При виготовленні двигунів цієї серії застосовуються нові просочувальні лаки, що забезпечують вищу цементацію і високу теплопровідність обмотки статора. Значно підвищена ефективність використання магнітних матеріалів. Протягом 2009 р. освоєні габарити 160 і 180, а протягом 2010-2011 рр. були освоєні габарити 280, 132, 200, 225, 250, 112, 315, 355 мм.

Серія 7AVE відповідає стандартам енергоефективності IE1, IE2 з можливістю створення машин до рівня IE3 Premium. Технологічними перевагами двигунів серії 7AVE є низькі шумові характеристики (на 3–7 дБ нижче, ніж у

двигунів попередньої серії), тобто більш ергономічні; вищі показники надійності за рахунок зниження робочих температур, що забезпечує надійну роботу при тривалих перевантаженнях на 10–15 %; знижені значення наростання температури при загальмованому роторі, що дозволяє забезпечити надійну роботу в системі приводу механізмів з частими і важкими пусками і реверсом. Двигуни серії 7AVE адаптовані до роботи у складі частотно-регульованого електроприводу. У таких умовах роботи особливо актуальні такі переваги:

– підвищена кратність максимального моменту в зоні низьких частот сприятливо впливає на роботу машини в області частот 0–20 Гц, а також знижує час пуску електродвигунів у високо інерційних системах;
– високий сервіс-чинник електродвигуна дозволяє працювати з постійним моментом у першій зоні механічної характеристики, не застосовуючи систему незалежної вентиляції.

Конструкцією енергоощадного електродвигуна передбачені місця встановлювання датчиків температури, які забезпечують вбудований температурний захист. Електродвигуни відповідають новому стандарту IEC 6003430. Не дивлячись на високу результативність, нині існує ряд перешкод для поширення енергоефективних систем електроприводу: заміна лише одного або двох електродвигунів на цілому підприємстві є неефективним заходом; низький рівень інформованості споживачів про класи енергоефективності двигунів, їх відмінності та існуючі стандарти; окреме фінансування на багатьох підприємствах: розпорядник бюджету при закупівлі електродвигунів часто є не тією особою, яка займається питаннями зниження собівартості продукції, що випускається, або несе щорічні витрати на технічне обслуговування; придбання електродвигунів у складі комплектного устаткування, виробники якого часто з метою здешевлення продукції встановлюють електродвигуни низької якості; витрати на придбання устаткування і на витрату енергії за термін служби часто оплачуються за різними статтями; на багатьох підприємствах існують запаси електродвигунів, як правило, того ж типу і того ж класу ефективності.

Впровадження енергоефективних двигунів в електроприводах забезпечує: економію споживання електроенергії за рахунок вищих ККД двигунів; економію за рахунок зниження встановленої потужності, необхідної для роботи устаткування з енергоефективним приводом; підвищення терміну служби та надійності двигунів; - зниження рівня шуму та вібрації.

1.5 Регульований електропривід як засіб підвищення ефективності виробництва

1.5.1 Загальні питання

Яким чином знизити собівартість продукції одночасно поліпшивши її якість? Яким чином максимально швидко і за мінімальних затрат освоїти новий вид продукції? Ці питання є актуальними і потребують відповіді, що пояснює інтерес широкого кола фахівців до пошуку методів і засобів їх вирішення. Високоефективним засобом вирішення вказаних питань на етапі виробництва продукції, в той же час унікальною за своїми характеристикою можливістю для інвестицій, є впровадження регульованого електроприводу. Серед спектру завдань, які можуть бути вирішені застосуванням регульованого електроприводу, слід виділити такі, де його використання є найбільш ефективним, отже такі, що є найбільш привабливими для інвестицій.

У відомих публікаціях [5-12] здійснюється глибокий аналіз та оцінка деяких конкретних застосувань регульованого електроприводу, що є корисним при вирішенні аналогічних завдань, але не дає загального уявлення про сфери ефективного застосування регульованого електроприводу. Таке уявлення необхідне для початкової якісної оцінки, зокрема потенційним інвестором, доцільності першочергової модернізації того чи іншого технологічного об'єкта з метою забезпечення максимально швидкого повернення інвестицій та отримання прибутку, який може бути реінвестований у модернізацію нових об'єктів, що забезпечить в короткий термін та за умови обмежених ресурсів переобладнання

існуючого виробництва і його перехід на більш сучасний, конкурентоздатний технологічний рівень.

За результатами, перш за все, власного практичного досвіду застосування регульованих електроприводів, систематизації результатів таких застосувань різноманітними компаніями, викласти таку точку зору на вирішувані за допомогою регульованих електроприводів завдання, яка дозволить потенційному інвестору на етапі попередньої, якісної оцінки доцільності інвестування у модернізацію обладнання існуючого виробництва, виділити виробничі об'єкти, модернізація яких шляхом впровадження регульованого електроприводу буде максимально ефективною.

Основним підходом до вирішення поставленого завдання є забезпечення можливості швидкого налаштування технологічних процесів виробництва відповідно до факторів, що змінюються, таких, наприклад, як вид і якість сировини. Засобом, що дозволяє реалізувати такий підхід є регульований електропривід, який набуває все більшого поширення, як ефективний електромеханічний перетворювач енергії. Завдяки зручності транспортування електричної енергії та широкому застосуванню механічної енергії, електропривід міцно увійшов до нашого життя. Близько 80% всього парку електричних машин складають асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Тому особливий інтерес викликає асинхронний регульований електропривід.

Метою даного розділу роботи є розгляд електроприводу, як засобу вирішення поставлених вище питань, а саме: частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі перетворювача частоти (який інколи називають "електронним регулятором швидкості і моменту асинхронних двигунів").

Відзначимо, що, якщо у власника (або керівника) підприємства виникне бажання порівняти можливості устаткування підприємства, які з'явилися після застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу, з тими, що були до його застосування, то асинхронний електропривід дозволяє перейти на старий режим роботи всього протягом чверті години. Перетворювач частоти у

складі регульованого електроприводу забезпечує гнучкість технологій і економію електроенергії. Перш за все, регульований електропривод вигідно застосовувати у випадках, коли на підприємстві (або конкретному устаткуванні, обладнанні) спостерігається наступне:

- змінюється кількість продукції, що випускається, в одиницю часу;
- змінюється вхідний матеріал для різних видів продукції;
- можна поліпшити технологічний процес, використовуючи плавне регулювання його параметрів;
- технологічне устаткування, насоси, вентилятори працюють із змінним, або неповним навантаженням;
- потрібні часті пуски, зупинки, реверс приводних двигунів, і виникає необхідність знизити навантаження на устаткування та витрати енергії в перехідних режимах, продовжити термін служби трубопроводів, усунувши гідроудари в них, зробивши плавний пуск насосів, виникає необхідність зменшити витрати на обслуговування устаткування, замінивши приводи з редукторами і варіаторами на регульовані асинхронні електроприводи;
- є перевитрата електроенергії.

Плавне регулювання швидкості обертання є найкращим способом пристосувати привід до змінних обставин. Чудовим прикладом важливості регулювання процесів за рахунок регулювання швидкості обертання є автомобіль. Водій погоджує швидкість руху автомобіля з різними зовнішніми умовами, оптимальна швидкість досягається зниженням частоти обертання двигуна і перемиканням на нижчу швидкість. Але уявімо, що регулювання швидкості автомобіля здійснюється тільки гальмами, при роботі двигуна на повних обертах! Природно, краще регулювати швидкість обертанням двигуна, що економить енергію, скорочує знос машини і гнучко узгоджує рух з навколишніми умовами.

Регулювання швидкості обертання є природним способом досягнення необхідного робочого стану процесу, містить в собі ряд переваг, цінність яких безпосередньо може бути виміряна грошима: зручність регулювання і роботи

системи (м'який пуск, регульовані час прискорення і уповільнення, точна швидкість, можливість дистанційного керування, сполучення з ЕОМ). Переваги дозволяють понизити капіталовкладення, експлуатаційні затрати, трудові затрати, спростити конструкцію машин, підвищити ступінь автоматизації і ін., що дозволяє зберегти гроші.

Використання регульованих електроприводів дозволяє понизити знос устаткування і скоротити витрати на техобслуговування, оскільки при зниженні швидкості часто знижується також момент, тиск і механічне навантаження на деталі машини. Регулювання швидкості обертання виключає різкі шкідливі зміни навантаження, дозволяє отримати м'який пуск і м'якшу роботу приводу, скоротити потребу в ремонті і понизити витрати на техобслуговування устаткування.

Використання регульованих електроприводів дозволяє одночасно збільшити випуск продукції і підвищити її якість. Звичайне збільшення об'єму продукції знижує якість, а підвищення якості приводить до зменшення випуску продукції. Це часто пов'язано з питанням оптимізації, яке важко вирішити на стадії проектування. Якщо змінити об'єм продукції регулюванням швидкості, то оптимізацію кількості і якості продукції можна виконати пізніше.

Прикладом реалізації проекту регулювання швидкості обертання, що оптимізує роботу устаткування, є волочильний стан для протягування дроту, в якому, завдяки застосуванню регульованого електроприводу, вдалося реалізувати м'який пуск і роботу на різних швидкостях, що дозволило зменшити обриви дроту, т.ч. його відходи і розширити асортимент продукції, що випускається підприємством.

Гарним прикладом оптимізації об'єму виробництва служить привод лісопильної лінії. Діаметри колод, які розкроюються, можуть змінюватися в широких межах (від 20 до 70 см). Товсті колоди необхідно розпилювати на нижчій швидкості тому, що вони здійснюють велике навантаження на пилку. Якщо швидкість розпилювання колоди прийняти відповідно до самого великого діаметру колод, обсяг виробництва буде низьким при розпилюванні тонких

колод. Проблема часто вирішується за допомогою двохшвидкісного двигуна. Однак, застосування безступеневого регулювання забезпечує значне підвищення середньої швидкості розпилювання. Завдяки впровадженню регулювання швидкості, випуск продукції на лісопильних заводах вдається збільшити на 10-15 %.

Використання регульованих електроприводів дозволяє економити енергію за рахунок зменшення споживаної потужності оптимізацією роботи приводу [4-9] через регулювання швидкості обертання. Значна економія спостерігається в приводах насосів і вентиляторів, в яких споживання потужності знижується пропорційно третій степені від швидкості. У багатьох насосів економія перевищує 50 %, що при великих потужностях означає заощадження великої суми грошей. На рисунку 1.3 нижче представлене споживання насосом потужності при регулюванні подачі дроселюванням і регулюванням обертів двигуна.

На рисунку 1.5 показані втрати енергії на лінії розподілу з електростанції до окремого насоса. При регулюванні подачі насосу потужністю 100 кВт шляхом дроселювання втрати потужності всієї лінії перевищують 800 кВт, хоча потужність насосу лише 100кВт!

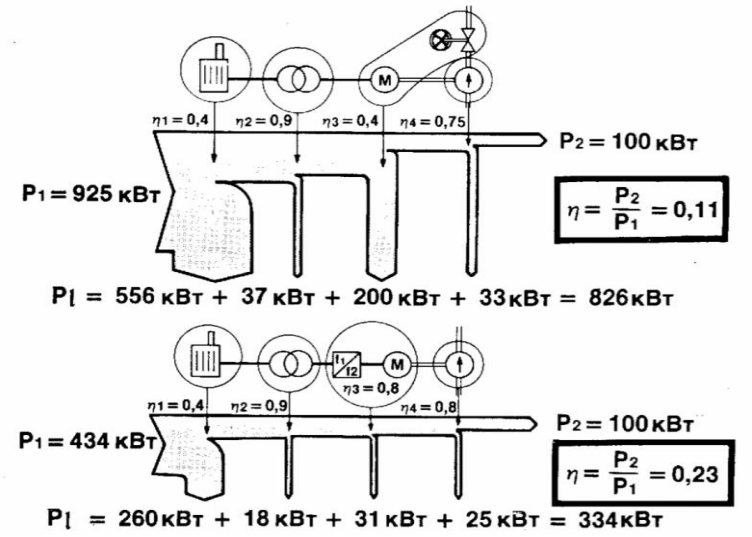


Рисунок 1.5 - Втрати енергії на лінії розподілу з окремого насосу для випадків дросселюванням та регульованим електроприводом

При регулюванні швидкістю обертання втрати перевищують 300 кВт, проте в такому приводі потужністю 100 кВт у нас буде економія 500 кВт, що вже виправдовує себе.

Нижче наведені приклади використання регульованого електроприводу на об'єктах різного призначення, що дозволяє підвищити ефективність роботи об'єктів (та рентабельність виробництва).

1.Насосна станція. У промисловості, на электростанциях і в комунальному господарстві застосовується велика кількість насосів: насоси для очищеної і стічної вод, для розбавленої водою паперової маси, для різних хімікатів і так далі. Деякі процеси можуть мати декілька ввімкнених паралельно або послідовно насосів, управління якими здійснюється від спільної системи автоматики, обчислювальної машини, або т.ін. Регулювання швидкості насосів полегшує управління роботою насосної станції. Одночасно забезпечується економія енергії і скорочення витрат на спорудження установки.

2. Занурюваний насос. Використовується, головним чином, для перекачування стічних вод. Вся установка може бути занурена у воду. В насосному агрегаті вбудований короткозамкнений електродвигун у водонепроникному виконанні. В порівнянні з іншими насосами, занурюваний насос має істотну перевагу, яка полягає у значно нижчих масогабаритних показниках та витратах. Ряд переваг занурюваним насосам дає регулювання обертання: досягається більш рівномірний потік на спорудах біологічного очищення; економія енергії, завдяки зменшенню втрат в трубопроводах; можливість регулювання кількості зворотного мулу. Причому, застосування регульованого електроприводу вважається найкращим способом регулювання швидкості обертання занурюваних насосів.

3.Вентилятор димових газів. У сучасних котельних установках застосовуються вентилятори димових газів, які підвищують продуктивність і К.К.Д. паливних котлів. При зміні тиску повітря і потреби в тепловій енергії, необхідно регулювати тягу. Найкращим способом регулювання відсмоктування димових газів - є спосіб регулювання швидкості обертання двигуна насосу, що

дозволяє заощадити енергію, поліпшити ефективність роботи котла, зменшити знос устаткування, а також шум. Прикладом такого застосування є котельня у м. Черкаси, де витрати з придбання та встановлення електроприводу окупилися за пів року його експлуатації.

4.Лісопильна лінія. Лісопильний завод є типовим процесом з різномаїттям агрегатів, послідовно розташованих один за одним. Є верстати обкоровочні і рубильні, стрічкові пили, установки торцування і інші. Крім того, між різними ділянками передбачені транспортери. Регулювання швидкості обертання забезпечує можливість регулювання продуктивності і вибору найкращої швидкості відповідно до діаметру і твердості колод. Перевага віддається способу регулювання, при якому велика частка виробничої лінії працює на одній швидкості.

5.Волочильний стан. Застосування регульованого електроприводу на волочильному стані підприємства «Черкасисталь» у м. Черкаси дозволило розширити асортимент продукції, яка випускалася (збільшити різновиди випуску цвяхів та сітки-рабиці), скоротити витрати дроту при його волочінні на волочильному стані.

6.Транспортери, шнекові транспортери. Шнекові транспортери використовуються для переміщення зернистих і пластиновидних матеріалів, таких як тріски, кора, тирса, тощо. Регульований електропривід дозволяє підвищити точність дозування матеріалів і зменшити знос деталей машин. Застосування регульованого електроприводу на транспортері зворотного тютюну Черкаської тютюнової фабрики дозволило зменшити відходи тютюну. Застосування регульованого електроприводу на шнековому транспортері автомату для виготовлення печива -сендвічів на Черкаській бісквітній фабриці дозволило оптимізувати подачу крему в залежності від консистенції крему.

7.Завантаження дефибера. У дефибері готується деревна маса для виробництва паперу. Як приводний двигун в дефибері використовується потужній асинхронний або синхронний електродвигун. Пристрій завантаження має менш потужний двигун, швидкість обертання якого повинна регулюватися, з

метою забезпечення оптимального к.к.д. процесу дефибрування і виключення перевантаження головного двигуна.

Пристрій завантаження ланцюгового виконання з регулюванням швидкості обертання дає можливість застосовувати простий спосіб регулювання шляхом заміру навантаження головного двигуна.

8. Шліфувальний верстат. Для шліфування металевих виробів застосовуються шліфувальні станки з шліфувальними кругами, що обертаються. В процесі шліфування круги сильно зношуються, зменшується їх діаметр і кругова швидкість, причому знижується продуктивність верстату, якщо не підвищується швидкість обертання. Регулювання швидкості обертання забезпечує підвищення продуктивності і поліпшення якості виробів.

1.5.2 Ефективність використання обладнання з регульованим електроприводом

Стовідсоткової ефективності використання виробничого обладнання, на жаль, неможливо досягти. У деяких випадках використовуються дубльовані системи, які забезпечують роботу один одного при порушенні режиму роботи. Що стосується пристроїв регулювання швидкості, частотний перетворювач є єдиною системою, яка може забезпечити повне резервування без додаткових пристроїв. Частотний перетворювач має унікальну перевагу: виникнення несправності не вимагає простою обладнання і, отже, великих збитків у виробництві. Коли в якості приводного двигуна служить короткозамкнений електродвигун, перетворювач може бути просто зашунтованим, наприклад, на час перевірки або у разі перешкоди в його роботі. Інші системи регулювання швидкості не дають такої можливості без дорогих дублюючих систем, котрі вимагають додаткового місця. Частотний перетворювач дозволяє наблизитися до магічної межі 100 %-ї ефективності застосування.

1.5.3 Витрати на техобслуговування

Найдорожчі роботи з техобслуговування для різних пристроїв регулювання швидкості обертання наступні: заміна вугільних щіток, контроль колектора, контроль зносу, мастило, заміна фільтру і контроль та заміна мастила, запчастини, контроль підшипників, запасний двигун. В разі застосування перетворювача частоти і асинхронного короткозамкненого двигуна залишається тільки виконати заміну мастила і контроль підшипників. Вартість таких робіт найнижча, причому вони потрібні і в разі застосування нерегульованого приводу. З цього виходить, що заміна нерегульованого приводу регульованим асинхронним електроприводом не викликає підвищення витрат на поточне обслуговування. Існують регульовані приводи, заміна яких регульованими асинхронними електроприводами виправдається вже за рахунок зниження витрат на техобслуговування.

Якщо додатково зпіставити вартість запасного двигуна постійного струму і короткозамкненого двигуна, то привід асинхронний, поза сумнівом, виявиться економічно обгрунтованим варіантом.

Що стосується частотно-регульованих асинхронних електроприводів, відзначимо наступне. Частотний перетворювач є супервигідним капіталом для підприємства. При його використанні в системах електроприводів дуттєвих вентиляторів, окупність складає менше 12 місяців роботи, економія електричної енергії - 50% від потужності, спочатку споживаної вентилятором. Щороку електропривід заробляє для підприємства суму що майже вдвічі перевищує його вартість. І це при сьогоднішній ціні електроенергії. При збільшенні її ціни - надходження підприємства від його використання зростають. Реальний приклад застосування двох електроприводів дуттєвих вентиляторів потужністю по 75 кВт: загальна споживана потужність знизилася на 62кВт, економічний ефект від застосування склав 1488 кВт*годин на добу, або 543.1 МВт*годин на рік, що в

грошовому вираженні, при ціні електроенергії 0.25грн/(кВт*г), становить 135775 грн. щорічно.

Регульований асинхронний електропривод на базі перетворювача частоти є ефективним засобом вирішення цілої низки технологічних виробничих завдань.

Регульований асинхронний електропривод, як можливість для інвестицій, має унікальні характеристики:

- термін повернення інвестицій становить, як правило, від шести місяців до одного року;
- безризиковість (незалежно від ринкових змін електропривод може змінити власника лише за умови згоди останнього), швидке повернення інвестицій;
- термін експлуатації електроприводу становить близько 10 років, що в більшості випадків означає 9-18 кратне повернення інвестицій, пов'язаних з його придбанням та встановленням.

1.6 Основні шляхи модернізації електропривода насосу та формування вихідних даних

Механізм електропривода насосу приводиться в рух асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором ротором типу 4АН280S2У3 потужністю 160 кВт і частотою обертання n=2900 хв$^{-1}$.

Проект модернізації виконується шляхом інтеграції в існуючу систему електропривода перетворювача частоти, який в наш час найбільш широко використовується через безсумнівні переваги [13].

Завдяки плавному регулюванню частоти обертання асинхронного двигуна за допомогою перетворювача частоти, відповідно робочі параметри насоса будуть приведені у відповідність з режимом його роботи, згідно технологічним

процесом, що в кінці надасть можливість уникнути гідроударів, що виникають в системі, при звичайному дросельному регулюванні [13].

Таким чином, метою роботи є розробка універсального енергозберігаючого алгоритму управління асинхронним частотно-регульованим електроприводом.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання.

1. Розробка технічного рішення з модернізації схеми управління механізмом - застосування нового органу управління перетворювача частоти, який забезпечує надійну і безпечну експлуатацію насосу.

2. Розробка алгоритму екстремального керування насосу при його застосуванні.

3. Виконання моделювання перехідних процесів пуску двигуна без навантаження при скалярному і при прямому пусках.

2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕРЕЖЕВОГО НАСОСА

2.1 Розрахунок потужності двигуна

Згідно [14] потужність насоса дорівнює:

$$P_{н} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{н}}, \tag{2.1}$$

де Q – подача насоса, $м^3/с$;

$$Q = \frac{200}{3600} = 0{,}0555 \text{ } м^3/с;$$

H – напор, м; ρ – щільність води, ρ =1000 $кг/м^3$; $\eta_{н}$ – ККД насоса, $\eta_{н}$=0,5 [3].

$$P_{н} = \frac{1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}0555 \cdot 90}{0{,}5} = 98001{,}09 \text{ Вт} = 98{,}001 \text{ кВт} .$$

Потужність приводного електродвигуна вибирають на основі наведеної вище формули, але з урахуванням можливого відхилення режиму роботи насоса від його номінального (паспортного) режиму. Щоб не перевантажувати двигун при будь-яких режимах, його потужність вибирають із запасом [14]:

$$P_{д} = \frac{k \cdot P_{н}}{\eta_{п}}, \tag{2.2}$$

де k – коефіцієнт запасу, k = 1,4; $\eta_{п}$ – ККД передачі, при з’єднанні вілів двигуна і и насоса муфтою $\eta_{п}$=0,88 [14].

$$P_{д} = \frac{1{,}4 \cdot 98{,}001}{0{,}88} = 155{,}91 \text{ кВт}.$$

Обираємо асинхронний двигун (АД) типу 4АН280S2У3 [15], технічні характеристики якого наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики двигуна 4АН280S2У3.

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/хв	η, %	$Cos\varphi_{ном}$	$\frac{M_п}{M_{ном}}$	$\lambda=\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{I_п}{I_{ном}}$	J, кг/м^2	$S_н$, %
160	2979	88,5	0,85	0,85	2,3	4,5	1,6	0,7

2.2 Розрахунок основних параметрів двигуна і виробничого механізму

2.2.1 Побудова механічних характеристик двигуна і виробничого механізму

Номінальна частота обертання:

$$\omega_{ном} = 2 \cdot \pi \cdot n_{ном} / 60 = 2 \cdot \pi \cdot 2979 / 60 = 311,8 \text{ рад/с.} \quad (2.3)$$

Синхронна частота обертання:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot n_0 / 60 = 2 \cdot \pi \cdot 3000/ 60 = 314,16 \text{ рад/с.} \quad (2.4)$$

Номінальний момент:

$$M_{ном.} = P_{ном.} /\omega_{ном.} = 160000 / 311,8 = 513,2 \text{ Н·м.} \quad (2.5)$$

Критичне ковзання:

$$S_k = S_н \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,007 \cdot \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,031 \ . \quad (2.6)$$

Критичний момент асинхронного двигуна:

$$M_К = \lambda \cdot M_{ном.} = 2,3 \cdot 513,2 = 1180,4 \text{ Н·м.} \quad (2.7)$$

Залежність частоти обертання від ковзання:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s) = 314,16 \cdot (1 - s). \quad (2.8)$$

Рівняння механічної характеристики АД [5]:

$$M(\omega) = -\frac{2 \cdot M_k}{\frac{s(\omega)}{s_k} + \frac{s_k}{s(\omega)}} \quad . \quad (2.9)$$

$$M_{дв} = \frac{-2 \cdot M_к}{s/s_к + s_к/s} = \frac{-2 \cdot 1180,4}{s/0,031 + 0,031/s} = -\frac{2360,8}{s/0,031 + 0,031/s}.$$

Рівняння механічної характеристики насоса [14]:

$$M_0(\omega) = -[M_{0нас} + (M_{сном.нас} - M_0) \cdot (\frac{\omega}{\omega_{ном}})^2], \quad (2.10)$$

де $M_{о\ нас} = 0,1 \cdot M_{ном} = 0,1 \cdot 513,2 = 51,32$ Нм;

$M_{с\ ном\ нас} = 0,8 \cdot M_{ном} = 0,8 \cdot 513,2 = 410,76$ Нм.

$$M_c(\omega) = 0,1 \cdot M_{с.ном} + (M_{с.ном} - 0,1 \cdot M_{с.ном}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2,$$

$$M_c(\omega) = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 513,2 + 0,9 \cdot 0,8 \cdot 513,2 \cdot \left(\frac{\omega}{311,8}\right)^2;$$

$$M_c(\omega) = -(41,06 + 0,0038 \cdot \omega^2),$$

Рівняння спільної механічної характеристики :

$$M_д(\omega) = M(\omega) - M_о(\omega). \quad (2.11)$$

Змінюючи s в межах від 0 до 1, побудуємо механічні характеристики двигуна, насосу, та спільну характеристику з урахуванням впливу передачі, що представлені на рисунках 2.1 – 2.3 в програмі Mathcad 14 [16].

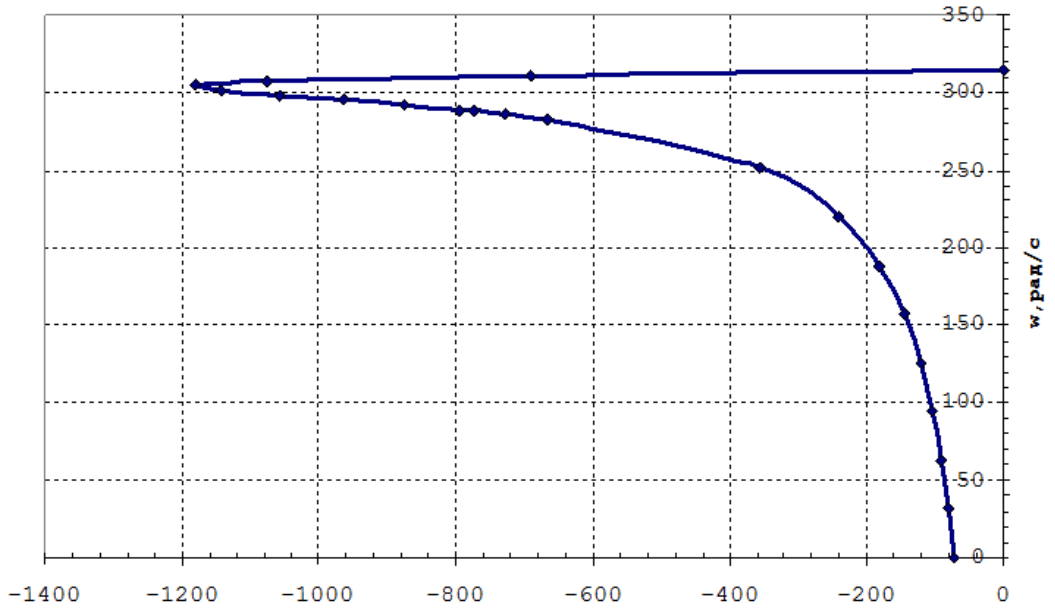


Рисунок 2.1 − Механічна характеристика двигуна

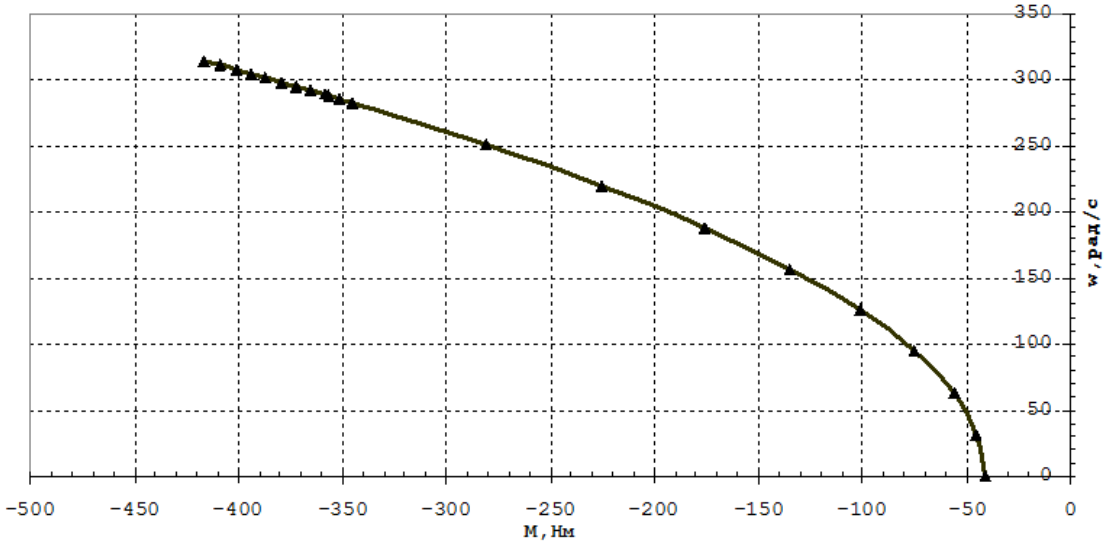


Рисунок 2.2 – Механічна характеристика насоса

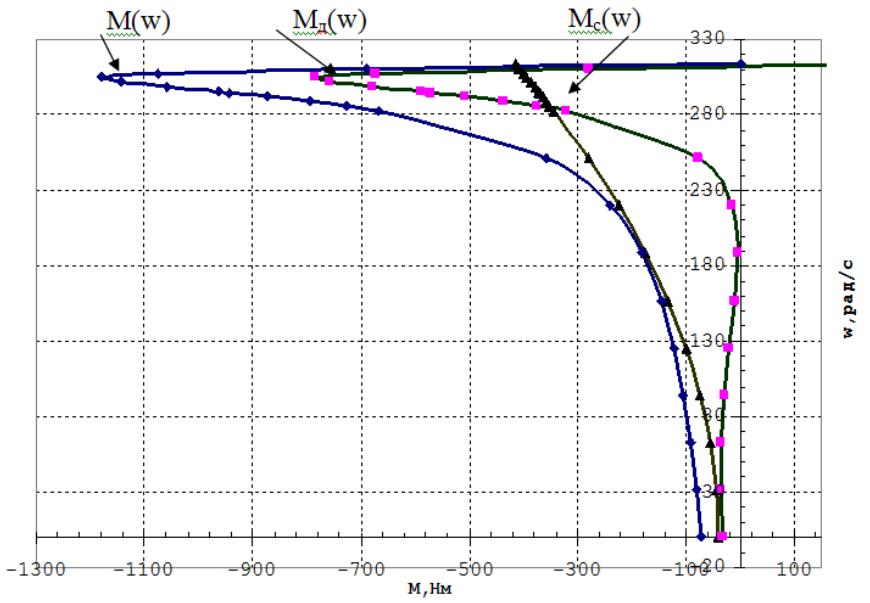


Рисунок 2.3 − Спільна механічна характеристика

Згідно з розрахунковими формулами (2.8)-(2.11) отримані дані представимо в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 − Розрахунки. Щодо побудови механічних характеристик двигуна, насоса, та спільної характеристики за формулами (2.8)-(2.11).

S,в.о.	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
M,Нм	0,000	-689,772	-1075,456	-1179,766	-1143,066	-1057,278	-962,747	-874,072	-795,379	-726,921	-667,684	-357,339	-241,372	-181,870	-145,809	-121,650	-104,345	-91,344	-81,220	-73,115
W,рад/с	314,16	311,02	307,88	304,74	301,59	298,45	295,31	292,17	289,03	285,89	282,74	251,33	219,91	188,50	157,08	125,66	94,25	62,83	31,42	0,00
Mc,Нм	-416,11	-408,64	-401,25	-393,94	-386,70	-379,54	-372,45	-365,44	-358,50	-351,64	-344,85	-281,09	-224,83	-176,08	-134,82	-101,07	-74,81	-56,06	-44,81	-41,06
Mд,Нм	416,11	-281,13	-674,20	-785,82	-756,36	-677,74	-590,30	-508,63	-436,88	-375,28	-322,84	-76,25	-16,54	-5,79	-10,99	-20,58	-29,53	-35,28	-36,41	-32,05

2.2.2 Визначення часу пуску і гальмування двигуна і побудова характеристик розгону і гальмування

Розрахунок часу пуску асинхронного двигуна виконуємо за методом площин [17,18] за допомогою програми Mathcad 14, який стандартною функцією цієї програми. Розіб'ємо вісь координат на ряд ділянок $\Delta\omega_I$, при цьому $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \ldots = \Delta\omega_I$. Вважаємо пуск прямим і роботу в тривалому режимі S1 [19]

Спільна механічна характеристика механізму замінюється апроксимуючою ламаною кривою і вважається, що на кожній ділянки розбиття значення моменту:

$$M_{di} = \frac{M_{di\ поч.} + M_{di\ кін.}}{2}, \qquad (2.12)$$

$M_{di\ поч.}; M_{di\ кін.}$ – початкове та кінцеве значення моменту і-їділянки.

Загальна тривалість пуску [14]:

$$t_{ї} = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i, \qquad (2.13)$$

де Δt_i – визначається для кожної ділянки розбиття за формулою [14]:

$$\Delta t_i = J \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{дi}^{ср.}}. \qquad (2.14)$$

Сумарний час розгону електроприводу до номінальної швидкості:

$$t = \sum_{i=1}^{100} \Delta t_i; \quad t = 7{,}39 \text{ с.}$$

Характеристика розгону електропривода наведена на рисунку 2.4.

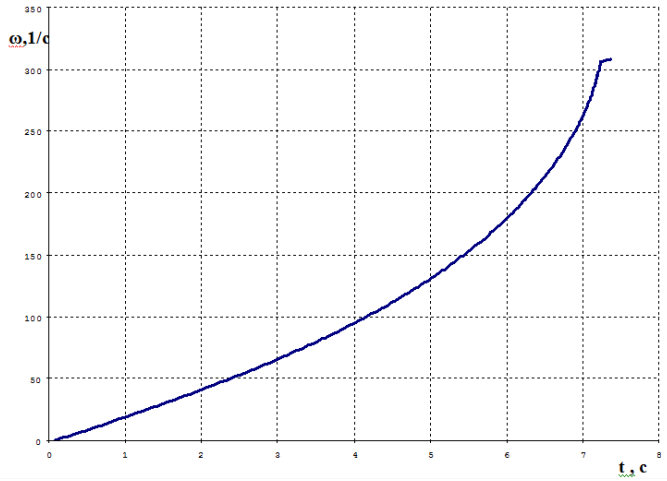


Рисунок 2.4 − Крива розгону електропривода

Побудова характеристики виконано в програмі Mathcad 14.

Розрахунок, щодо визнаечння часу гальмування виконаємо аналогічно вважаємо, що двигун проходе гальмування під дією моменту опору насоса [19].

Сумарний час гальмування:

$$t_c = \sum_{i=1}^{100} \Delta t_{Ci} \; ; \; t_c = 18{,}03 \text{ с.}$$

Характеристика гальмування електропривода наведена на рисунку 2.5. Побудова характеристики виконано в програмі Mathcad 14.

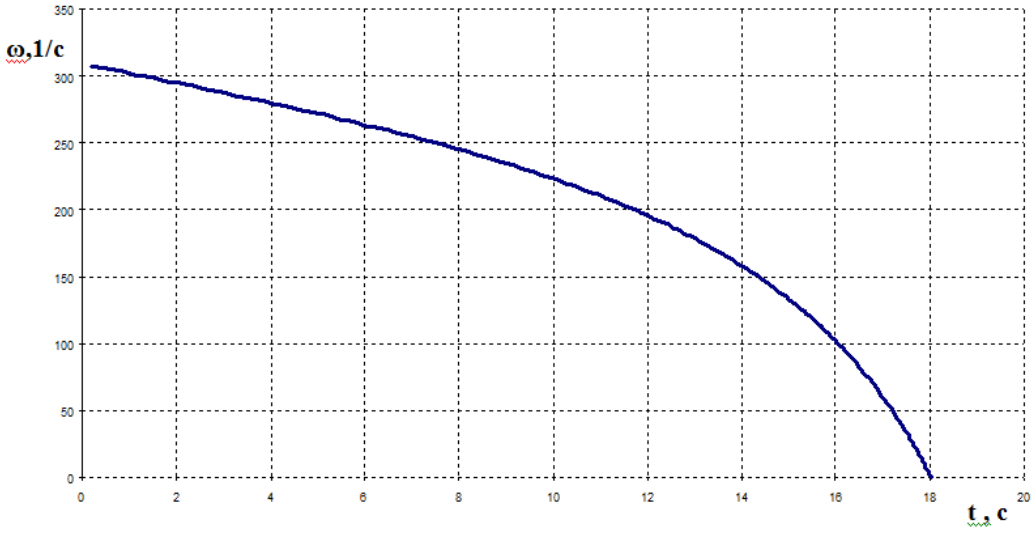


Рисунок 2.5 − Крива гальмування електропривода

2.2.3 Побудова кривих нагріву і охолодження двигуна

При складанні вираження для побудови кривої нагріву приймаємо клас ізоляції обмотки статора Н , яка розрахована на тривалу допустиму температуру $\Theta_{доп.}$=180ºС. Допустиме перевищення температури ізоляції над температурою навколишнього середовища

$$\tau_{уст.}^{ном.} = \Theta_{доп.} - 40^0 C = 140^0 C . \quad (2.15)$$

Постійна часу нагріву асинхронного двигуна [15]:

$$\mathrm{T_н} = 500 \text{ хв.}$$

Постійна часу охолодження [14]:

$$\mathrm{T_о} = 1{,}05 \cdot \mathrm{T_н} = 525\,хв. \quad (2.16)$$

Вираз для побудови кривої нагріву:

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_0 - \tau_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T\text{н}}} . \quad (2.17)$$

Вираз для побудови кривої охолодження:

$$\tau = \tau_{уст} \cdot e^{\frac{-t}{T\text{н}}} . \quad (2.18)$$

Криві нагріву та охолодження приводного двигуна наведено на рисунках 2.6 та 2.7.

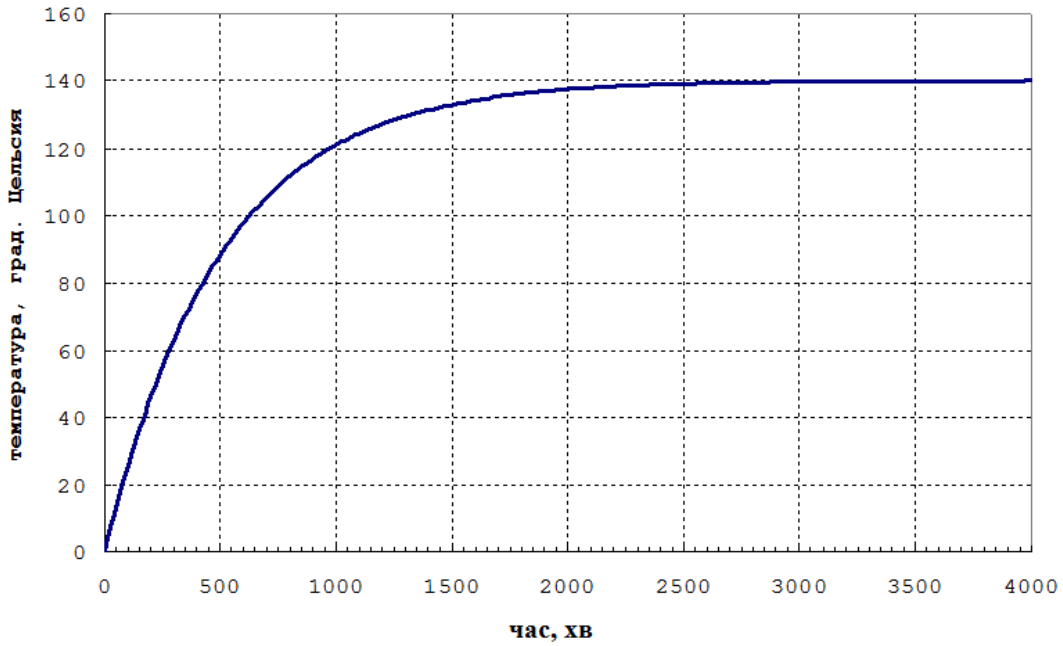


Рисунок 2.6 − Крива нагріву асинхронного двигуна

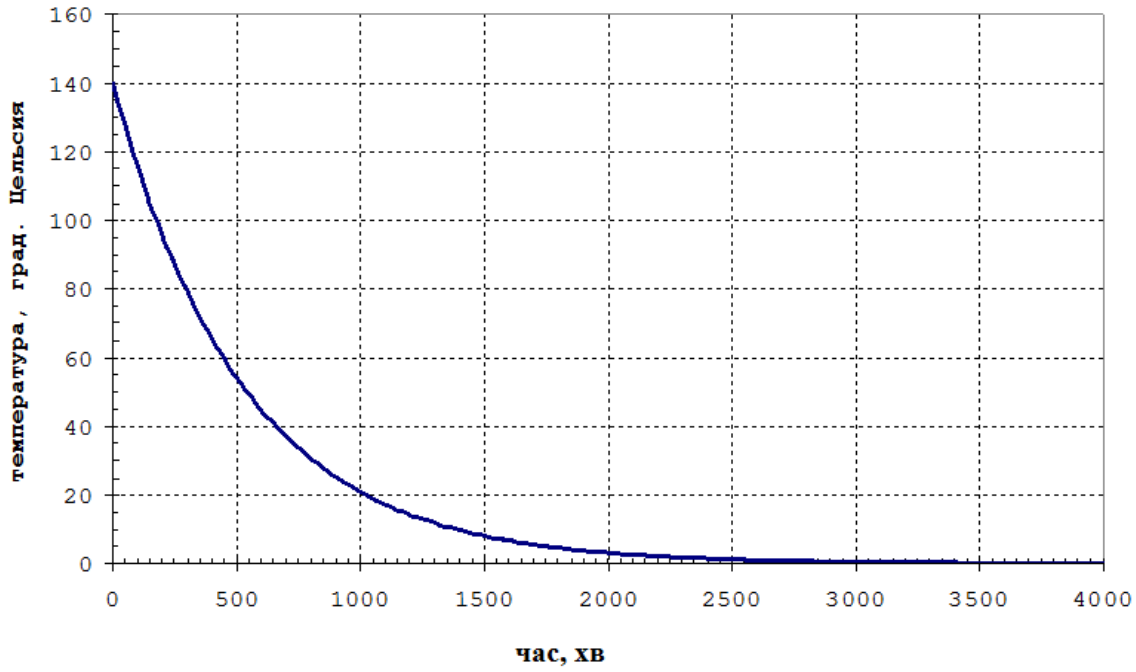


Рисунок 2.7 − Крива охолодження асинхронного двигуна

2.3 Вибір приводного двигуна

У зв'язку з тим, що зіпсовані зв'язки з Росією та відсутній ремонтний фонд задля заміни запасних частин двигунів серії 4А при модернізації прийнято рішення щодо встановлення двигуна серії АИР, який виготовляється на заводі заводі (НКЕМЗ), Україна. Завод спеціалізується на виробництві трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором загально промислового призначення та має сертифікат комплексної системи управління якості ISO 9001:2015.

Згідно [20] при синхронній швидкості 3000 об/хв найближчим за потужністю є двигун АИР 315S2 (IM 1081). Двигун обраної потужності задовольняє роботі насосу.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики електродвигуна

Типо-розмір	n_0, об/хв	$U_{1н}$, В	$P_{дв\,н}$, кВт	При номінальному навантаженні			S_K, %	$J_{дв}$, $кг \cdot м^2$	2p	m_1
				S_H, %	$cos\varphi_H$	η_H, %				
АИР 315S2 (IM 1081)	3000	380	160	0,006	0,85	97,2	0,1	1,3	2	1

Продовження таблиці 2.3

$K_П = \frac{M_{пуск}}{M_н}$	$\lambda = \frac{M_{макс}}{M_н}$	$K_M = \frac{M_{мін}}{M_H}$	$k_i = \frac{I_{пуск}}{I_H}$	Ступінь захисту
0,91	2,7	0,6	6,4	*IP*55

Таблиця 2.4 - Параметри схеми заміщення електродвигуна

$R_1^{'}$,від.од	$X_1^{'}$,від.од.	$R_2^{''}$,від.од.	$X_2^{''}$,від.од.
0,01	0,06	0,006	0,036

Відповідно до характеристик насосу раціональний інтервал зміни швидкості обертання приводного двигуна лежить в межах :

від $n_{еп\,макс} = 4200$ об/хв. до $n_{мін} = 2400$ об/хв.

що визначає діапазон регулювання швидкості приводного двигуна.

$$D_\omega = \frac{4200}{2400} = 1,75; \tag{2.19}$$

2.4. Розрахункові параметри електродвигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \ \ рад/с; \tag{2.20}$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{дв\,Н} = (1 - S_Н) \cdot n_0 = (1 - 0,006) \cdot 3000 = 2980 \ \ об/хв; \tag{2.21}$$

або

$$\omega_{дв\,Н} = (1 - S_Н) \cdot \omega_0 = (1 - 0,006) \cdot 314 = 312 \ \ рад/с; \tag{2.22}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{дв\,H} = \frac{P_{дв\,H}}{\omega_{дв\,H}} = \frac{160{,}0 \cdot 10^3}{312} = 480{,}77 \;\; H \cdot м; \qquad (2.23)$$

Номінальна фазна напруга і номінальний фазний або лінійний струм:

$$U_{1\,фн} = \frac{U_{1\,лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \;\; B; \qquad (2.24)$$

$$I_{1\,фн} = I_{1\,лн} = \frac{P_{дв\,н}}{3 \cdot U_{1\,фн} \cdot cos\varphi \cdot \eta_H} = \frac{160{,}0 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}972} = 293{,}4 \;\; A; \qquad (2.25)$$

Максимальний споживаний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{1\,max} = k_{i\,дв} \cdot I_{1\,лн} = 6{,}4 \cdot 293{,}5 = 1877 \;\; A; \qquad (2.26)$$

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{дв\,пуск} = K_п \cdot M_{двн} = 0{,}91 \cdot 480{,}7 = 437{,}5 \;\; H \cdot м; \qquad (2.27)$$

2.5 Визначення параметрів схеми заміщення

В довідковій літературі з АД завжди наводяться параметри, які відповідають номінальному режиму роботи двигуна. Тому одне із завдань при будь-якому моделюванні процесів в двигуні є визначення параметрів схеми заміщення.

Активний опір обмотки статора:

$$r_1 = \frac{U_{1фн} \cdot I_{1фн} \cdot cos\varphi - M_{дв\,н} \cdot \dfrac{\omega_c}{(m_1 \cdot p)}}{I_{1фн}^2} = \frac{220 \cdot 293{,}4 \cdot 0{,}85 - 480{,}7 \cdot \dfrac{314}{(3 \cdot 1)}}{293{,}4^2} = 0{,}03 \ \ Ом, \qquad (2.27)$$

де ω_c-кутова частота мережі живлення $\omega_c = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \ \ рад/с$;

Наведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора:

$$r_2^{'} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_{1фн}^2 \cdot S_H}{\omega_c \cdot M_{ндв}} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 220^2 \cdot 0{,}006}{314 \cdot 480{,}7} = 0{,}017 \ \ Ом; \qquad (2.28)$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$x_K = \sqrt{\left(\frac{r_2^{'}}{S_{KP}}\right)^2 - r_1^2} = \sqrt{\left(\frac{0{,}017}{0{,}1}\right)^2 - 0{,}03^2} = 0{,}017 \ \ Ом; \qquad (2.29)$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора:

$$x_{1\sigma} = x_{2\sigma}^{'} = \frac{x_K}{2} = \frac{0{,}17}{2} = 0{,}085 \ \ Ом, \qquad (2.30)$$

де $x_{2\sigma}^{'}$ - наведений до обмотки статора індуктивний опір розсіювання обмотки ротора.

Індуктивність обмотки статора обумовлена потоком розсіювання:

$$x_1 = 0{,}42 \cdot x_K = 0{,}42 \cdot 0{,}17 = 0{,}07 \ \ Ом; \qquad (2.31)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_c} = \frac{0{,}07}{314} = 0{,}00022 \ \ Гн; \qquad (2.32)$$

Наведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіювання:

$$x_2 = 0,58 \cdot x_K = 0,58 \cdot 0,17 = 0,1 \ Ом; \tag{2.33}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{\omega_c} = \frac{0,1}{314} = 0,00032 \ Гн; \tag{2.34}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування (головний індуктивний опір):

$$x_\mu = x_m \cdot Z_{баз}, \tag{2.35}$$

де $x_m = \frac{1}{\frac{I_H \cdot \left(\sqrt{1 - cos^2\varphi}\right)}{U_{1\phi}} - b} = \frac{1}{\frac{293,4 \cdot \sqrt{1 - 0,85^2}}{220} - 0,2} = 0,1 \ Ом;$ (2.36)

$$b = \frac{X_K}{\left(r_1 + \frac{r_2^{'}}{S_H}\right)^2 + X_K^2} = \frac{0,17}{\left(0,03 + \frac{0,017}{0,02}\right)^2 + 0,17^2} = 0,2; \tag{2.37}$$

$$Z_{баз} = \frac{U_H}{I_H} = \frac{220}{293,4} = 0,8 \ Ом; \tag{2.38}$$

$$x_\mu = 0,1 \cdot 0,8 = 0,08 \ Ом;$$

Результуюча індуктивність, зумовлена магнітним потоком в повітряному зазорі створюваним сумарною дією струмів статора (індуктивність контуру намагнічування):

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_c} = \frac{0,08}{314} = 0,00025 \ Гн; \tag{2.39}$$

Отримані параметри т-подібної схеми заміщення електродвигуна АИР 315S2 (IM 1081) зведені в таблицю 2.5

Таблиця 2.5 - Параметри схеми заміщення електродвигуна АИР 315S2 (IM 1081)

r_1, Ом	$x_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	x_μ, Ом	L_m, Гн	$r_2^{'}$, Ом	$x_{2\sigma}^{'}$, Ом	$L_{2\sigma}^{'}$, Гн	x_K, Ом
0,03	0,085	0,00022	0,08	0,00025	0,17	0,085	0,00032	0,17

2.6 Вибір перетворювача частоти

Умови вибору : $S_П > S_д;\ \ U_П > U_Д;\ \ I_П > I_Д$

Для регульованого асинхронного електроприводу насосу пропонується використовувати перетворювач, який входить до комплекту приводної системи фірми Siemens Micromaster ECO, Німеччина.

При виборі перетворювача частоти необхідно дотримуватися умови:

$$I_{dн} \geq I_н;$$

$$U_{dн} \geq U_н,$$

$$P_{пн} \geq P_н,$$

де $I_{dн}$ – номінальний струм перетворювача, А;

$U_{dн}$ – номінальна напруга перетворювача, В;

$P_{пн}$– номінальна потужність перетворювача, кВт;

$I_н$ – номінальний струм двигуна, А;

$U_н$ – номінальна напруга двигуна, В;

$P_н$– номінальна потужність двигуна, кВт;

$$320 \text{ А} > 293{,}4 \text{ А};$$

$$380 \text{ В} \geq 380 \text{ В};$$

$$200 \text{ кВт} \geq 45 \text{ кВт}.$$

Обираємо ПЧ фірми SIEMENS, параметри якого наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Технічні характеристики перетворювача Siemens SINAMICS G120 200 кВт - 6SL3228-0BE45-6UA0

Параметри перетворювача	Значення параметра
1. Напруга живильної мережі Uн, В	380
2. Частота мережі, Гц	50…60
3. Діапазон регулювання вихідної напруги	0 ... Uн
4. Діапазон регулювання вихідної частоти, Гц	0,5 ... 50 (60; 200; 400)
5. Дискретність регулювання частоти, Гц	0,1
6. ККД, %	98
7. Коефіцієнт потужності	0,98

Типова схема зовнішніх підключень електропривода наведена на рисунку 2.8.

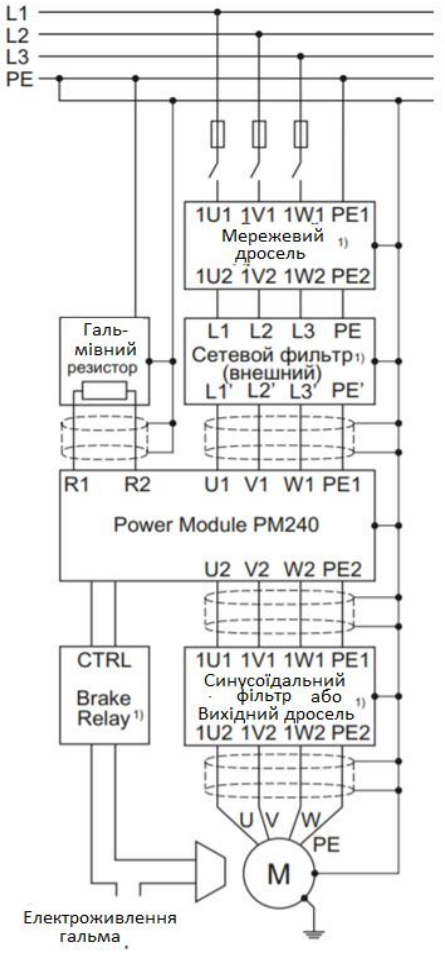


Рисунок 2.8 – Типова схема зовнішніх підключень електроприводів Siemens SINAMICS G120 200 кВт - 6SL3228-0BE45-6UA0

Загальні технічні дані перетворювача частоти серії Siemens SINAMICS G120 200 кВт - 6SL3228-0BE45-6UA0:

- елементна база IGBT транзистори;
- коефіцієнт потужності 0,95;
- принцип керування векторний;
- діапазон регулювання швидкості 1 : 1500;
- вплив гармонік $\leq$ 3%;
- ККД 97 %;
- не потребує фільтру гармонік.

2.6.1 Оцінка надійності модернізованого електропривода

Надійність - це властивість електроприводу (ЕП) виконувати необхідні функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники і характеристики протягом заданого часу. Надійністю є комплексна властивість, що поєднує в собі поняття працездатності, безвідмовності, довговічності і ремонтопридатності.

При практичних розрахунках надійності електроприводу виникають труднощі через відсутність достовірних даних для більшості номенклатури елементів, вузлів і пристроїв електроприводу. Вихід з цього положення дає застосування так званого коефіцієнтного методу, широко використовуваного при розрахунку надійності електродвигуна.

Суть коефіцієнтного методу полягає в тому, що при розрахунку надійності ЕП використовують не абсолютні значення інтенсивності відмов λ_J, а коефіцієнти надійності K_J, що зв'язують значення λ_I з інтенсивністю відмов $\lambda_б$ якого-небудь базового елементу:

$$K_i=\lambda_i/\lambda_б;$$

Коефіцієнт надійності К практично не залежить від умов експлуатації і для даного елементу є константою, а відмінність умов експлуатації враховується відповідною зміною λ>б.

Вплив на надійність елементів основних дестабілізуючих факторів – електричних навантажень і температури навколишнього середовища – враховується введенням в розрахунок поправочних коефіцієнтів.

Результуючий коефіцієнт надійності елементів ЕП з урахуванням електричних навантажень і температури навколишнього середовища (виключаючи релейно-контактну систему).

$$K'_I = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot K_i;$$

де K'_i - номінальне значення коефіцієнта надійності; a_1 – коефіцієнт, що враховує відхилення температури навколишнього середовища і електричного навантаження від номінальної; a_2 – коефіцієнт, що враховує відхилення температури навколишнього середовища від номінальної; a_3 – коефіцієнт, що враховує зниження електричного навантаження відносно номінального; a_4 – коефіцієнт використання елементу, визначуваний відношенням часу роботи елементу до часу роботи ЕП.

Коефіцієнт надійності релейно-контактних апаратів:

$$K'_i = [K_{i0} \cdot a_4 + (\sum_{j=1}^{n} K_{jk} \cdot a_3) \cdot \frac{f_Ф}{f_{НОМ}}],$$

де K_{i0} і K_{jk} - номінальні коефіцієнти надійності сприймаючої (коло котушки) і виконуючої частини (контактна система) частин апаратури; a_3 – поправочний коефіцієнт, що враховує рівень електричного навантаження контактів; a_4 – поправочний коефіцієнт, що враховує частку часу знаходження обмотки під напругою протягом одного циклу; n – число контактних груп; $f_Ф$ і $f_{ном}$ – фактичне і номінальна частота спрацьовування апарату у годину.

Після визначення коефіцієнтів надійності окремих елементів розраховуються показники надійності ЕП в цілому. Вірогідність безвідмовної роботи:

$$p(T_5) = \exp[-\lambda_б \cdot T_5 \sum_{i=1}^{n} N_i \cdot K_i'],$$

де N – число однотипних елементів і-ої групи в ЕП; n – загальне число елементів в ЕП, що мають логічно послідовне з'єднання.

Напрацювання до відмови ЕП:

$$T_5 = \frac{1}{\lambda_5 \cdot \sum_{i=1}^{n} N_i \cdot K_i'}.$$

Для розрахунку у відповідності з рекомендаціями приймаємо інтенсивність відмов базового елементу - інтенсивність відмови насоса $\lambda_б$=0,036·10^{-6} 1/год. Всі розрахунки зводимо в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахунок надійності системи ПЧ-АД

Елементи	$\lambda_{max}10^{-6}$	$\lambda_{min}10^{-6}$	K_i	a_1	a_2	a_3	a_4	K_i'	K_i''	N	$K_i' \cdot N$
Двигун	65,6	0.8	22,22	1	1	0,8	2,4	42.66		1	42.67
Насос	0,036	0,11	1					1		1	1
Пускачі	13,7	0,35	9,72			0,7	0,7	–	20,2	2	40,5
Інвертор	100	10,7	297,22					297,22		1	297,22
Реостат	0,19	0,07	1,944					1,944		10	19,44
Діоди	0,38	0,23	8,389	0,25				1,59		8	11,78
Дроселі	0,1	0,01	0,278					–	2,25	6	13,5
Транзистори	0,6	0,07	1,944	0,25				0,49		8	3,89
Конденсатор	0,054	0,003	0,083	0,02				0,00108		14	0,015
Сума											431,01

Розрахуємо напрацювання до відмови і вірогідність безвідмовної роботи за час T_e = 5000 ч.

$$T_0 = \frac{1}{0{,}036 \cdot 10^{-6} \cdot 431{,}015} = 64447{,}543 \text{год.};$$

$$p(5000) = \exp[-0{,}036 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 \cdot 431{,}015] = 0{,}925.$$

Ніяких стандартів, що регламентують показники надійності системи ПЧ-АД змінного струму, поки не існує, але за основу можна прийняти стандарт (ГОСТ 5.764-71) для регульованих тиристорних приводів постійного струму, який передбачає, зокрема, середній термін служби 10 років (і вірогідність безвідмовної роботи 0,8 протягом 5000 годин експлуатації).

Знайдені показники надійності порівнюються з потрібними за технічними умовами. Якщо їх розрахункові значення нижче потрібних, виявляються менш надійні групи елементів і приймаються заходи по підвищенню надійності системи. Послідовність використання методів підвищення надійності, що рекомендується, наступна: зниження електричних навантажень на елементах схеми; використання елементів з вищими показниками надійності; забезпечення умов роботи елементів.

Даний ЕП задовольняє необхідним вимогам надійності.

2.7 Моделювання системи

2.7.1 Складання математичної моделі електропривода

Структурна схема векторної системи керування швидкістю асинхронного двигуна зображена на рисунку 2.9. На рисунку 2.10 наведена структурна схема асинхронного двигуна.

Розрахункові параметри опорів статора та ротора асинхронного двигуна:

$r_1 = 0{,}03$ Ом; $x_1 = 0{,}07$ Ом; $r_2 = 0{,}017$ Ом; $x_2 = 0{,}1$ Ом; $x_\mu = 0{,}08$ Ом.

Наведені на рисунку 2.9 та рис.2.10 змінні розраховуються виходячи з параметрів двигуна.

Кутова частота мережі живлення:

$$\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314\ c^{-1}; \qquad (2.40)$$

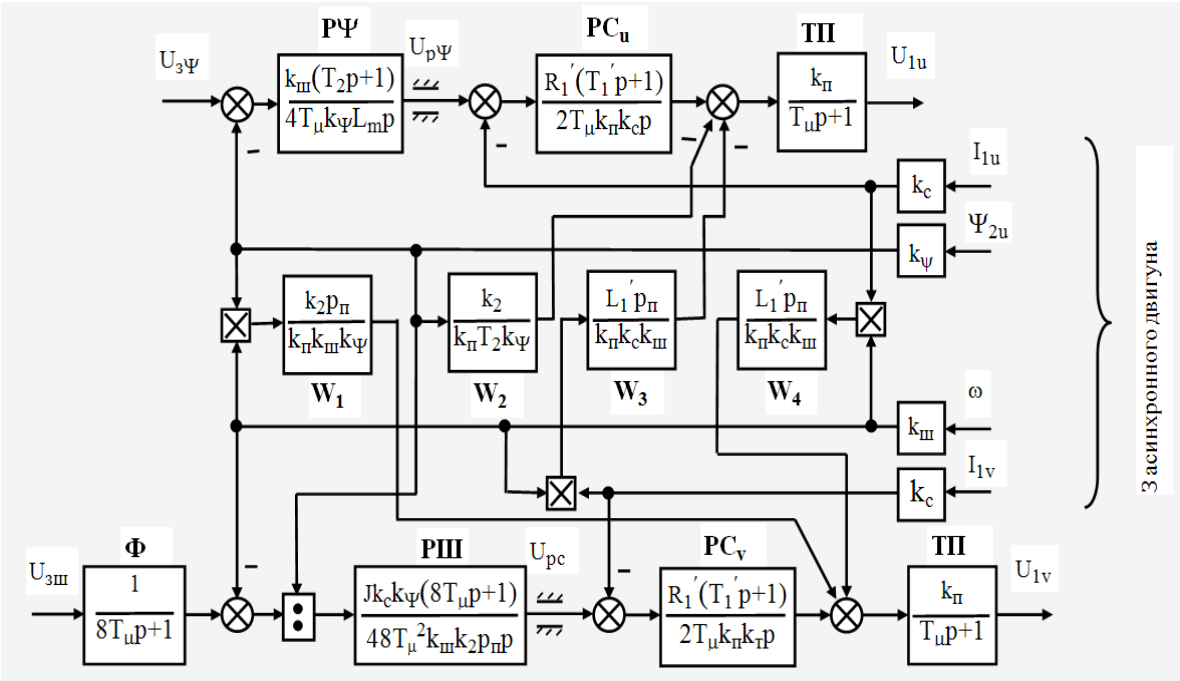


Рисунок 2.9 − Структурна схема векторної системи керування асинхронним двигуном

Кутова максимальна швидкість двигуна:

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_o}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 3000}{30} = 314\ c^{-1}; \qquad (2.41)$$

Кількість пар полюсів електродвигуна $p_п = 1$.

Індуктивність розсіювання обмотки статора двигуна:

$$L_{1\delta} = \frac{x_1}{\omega_o} = \frac{0{,}07}{314} = 0{,}00022\ Гн; \qquad (2.\ 42)$$

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{2\delta} = \frac{x_2}{\omega_o} = \frac{0,1}{314} = 0,00032 \text{ Гн}; \qquad (2.43)$$

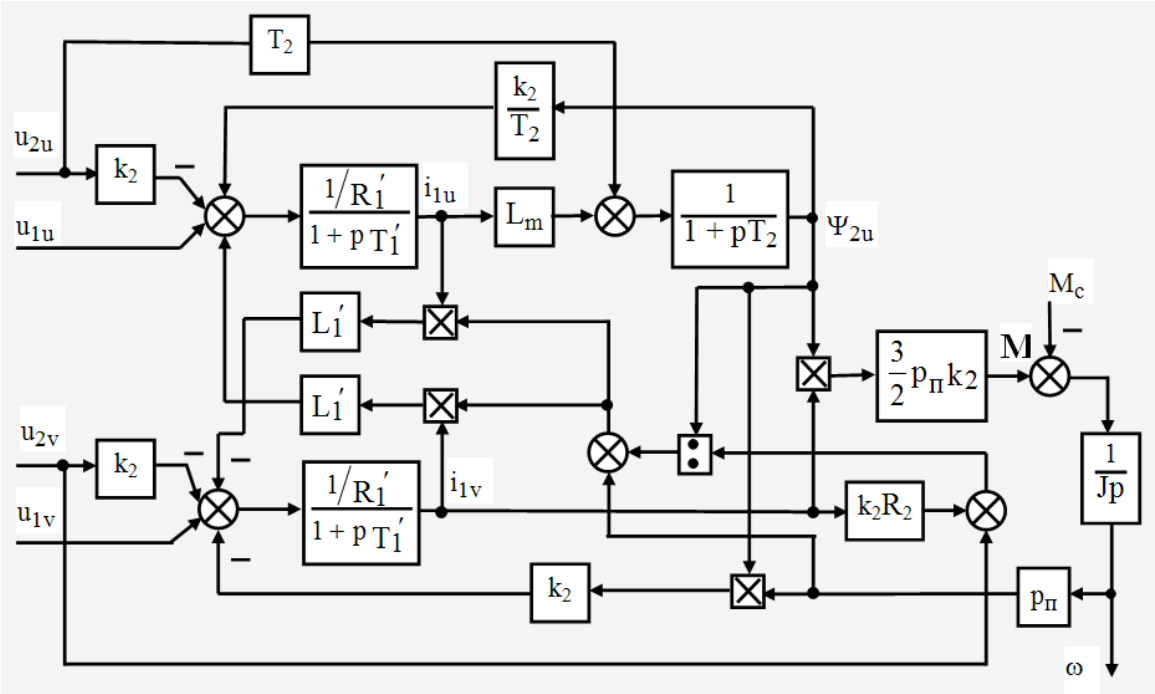


Рисунок 2.10 – Структурна схема асинхронного двигуна

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора та ротора:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_o} = \frac{0,08}{314} = 0,00025 \text{ Гн}; \qquad (2.44)$$

Загальна індуктивність обмотки статора:

$$L_1 = L_{1\delta} + L_m = 0,00022 + 0,00025 = 0,00047 \text{ Гн}; \qquad (2.45)$$

Загальна індуктивність обмотки ротора:

$$L_2 = L_{2\delta} + L_m = 0,00032 + 0,00025 = 0,00057 \text{ Гн}; \qquad (2.46)$$

Коефіцієнт електромагнітного зв’язку ротора:

$$k_2 = \frac{L_m}{L_2} = \frac{0,00025}{0,00057} = 0,44; \quad (2.47)$$

Еквівалентна індуктивність розсіювання двигуна:

$$L`_1 = L_{1\delta} + k_2 \cdot L_{2\delta} = 0,00022 + 0,44 \cdot 0,00032 = 0,00036 \text{ Гн}; \quad (2.48)$$

Еквівалентний активний опір двигуна:

$$R`_1 = r_1 + k_2 \cdot r_2 = 0,03 + 0,44 \cdot 0,017 = 0,037 \text{ Ом}; \quad (2.49)$$

Еквівалентна електромагнітна стала часу обмотки статора:

$$T`_1 = \frac{L`_1}{R`_1} = \frac{0,00036}{0,037} = 0,0097 \text{ с}; \quad (2.50)$$

Еквівалентна електромагнітна стала часу обмотки ротора:

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2} = \frac{0,00057}{0,017} = 0,034 \text{ с}; \quad (2.51)$$

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\psi = \frac{I_{1лн}}{1,5 \cdot \sqrt{2} I_{1нф} \cdot \rho_\pi \cdot \kappa_2} = \frac{293,4}{1,5 \cdot 1,41 \cdot 293,4 \cdot 1 \cdot 0,44} = 1,07 \text{ } Вб; \quad (2.52)$$

Максимальна напруга у системі керування: Ucmax = 10В.

Коефіцієнт передачі датчику струму:

$$\kappa_c = \frac{U_{cmax}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot I_{нф}} = \frac{10}{1,41 \cdot 2 \cdot 1517} = 0,0042 \ \ B / A; \tag{2.53}$$

Коефіцієнт передачі датчику швидкості:

$$\text{кш} = \frac{\text{Uc max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{314} = 0,032 \ \ \text{В} \cdot \text{с}; \tag{2.54}$$

Коефіцієнт передачі перетворювача частоти:

$$\text{кп} = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{Uф}}{\text{Uc max}} = \frac{1,41 \cdot 220}{10} = 97,3; \tag{2.55}$$

Коефіцієнт передачі датчику потокозчеплення:

$$\text{k}\psi = \frac{\text{U}_{\text{c max}}}{\psi} = \frac{10}{1,07} = 9,35 \ \ \text{В / Вб}; \tag{2.56}$$

Постійна часу силового перетворювача: $\text{Т}\mu = 0,0005 \ \text{с}$.

Розрахуємо передатні функції, що наведені на рисунках 2.3-2.4.

Перетворювач частоти:

$$\frac{\text{кп}}{\text{Т}\mu\text{р} + 1} = \frac{97,3}{0,0005\text{р} + 1}; \tag{2.57}$$

Ланка зв’язку W1:

$$\frac{\text{k}_2 \cdot \text{p}_{\text{п}}}{\text{кп} \cdot \text{кш} \cdot \text{k}\psi} = \frac{0,44 \cdot 1}{97,3 \cdot 0,032 \cdot 9,35} = 0,015; \tag{2.58}$$

Ланка зв’язку W2:

$$\frac{k_2}{k\pi \cdot T_2 \cdot k\psi} = \frac{0,44}{97,3 \cdot 0,034 \cdot 9,35} = 0,014; \quad (2.59)$$

Ланка зв’язку W3:

$$\frac{L`_1 \cdot p_п}{k\pi \cdot kc \cdot k\text{ш}} = \frac{0,00036 \cdot 1}{97,3 \cdot 0,0042 \cdot 0,032} = 0,028; \quad (2.60)$$

Ланка зв’язку W4:

$$\frac{L`_1 \cdot p_п}{k\pi \cdot kc \cdot k\text{ш}} = \frac{0,00036 \cdot 1}{97,3 \cdot 0,0042 \cdot 0,032} = 0,028; \quad (2.61)$$

Ланка $P\psi$:

$$\frac{kc \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{4 \cdot T\mu \cdot k\psi \cdot L_m \cdot p} = \frac{0,0042 \cdot (0,034 \cdot p + 1)}{4 \cdot 0,0005 \cdot 9,35 \cdot 0,00025 \cdot p} = 898,4 \cdot \frac{0,034 \cdot p + 1}{p}; \quad (2.62)$$

Ланка PTu :

$$\frac{R`_1 \cdot (T`_1 p + 1)}{2 \cdot T\mu \cdot k\pi \cdot kc \cdot p} = \frac{0,037 \cdot (0,0097p + 1)}{2 \cdot 0,0005 \cdot 97,3 \cdot 0,0042 \cdot p} = 90,54 \cdot \frac{0,037p + 1}{p}; \quad (2.63)$$

Ланка Ф:

$$\frac{1}{8 \cdot T\mu \cdot p + 1} = \frac{1}{8 \cdot 0,0005p + 1} = \frac{1}{0,004p + 1}; \quad (2.64)$$

Ланка $\frac{k_2}{T_2}$:

$$\frac{k_2}{T_2} = \frac{0,44}{0,034} = 12,9; \quad (2.65)$$

Ланка РШ:

$$\frac{J \cdot kc \cdot k\psi \cdot (8 \cdot T\mu \cdot p + 1)}{48 \cdot T\mu^2 \cdot k\text{ш} \cdot k_2 \cdot p_{\text{п}} \cdot p} = \frac{13 \cdot 0,0042 \cdot 9,35 \cdot (8 \cdot 0,0005p + 1)}{48 \cdot 0,0005^2 \cdot 0,032 \cdot 0,44 \cdot 1 \cdot p} = 3021484,4 \cdot \frac{0,004p + 1}{p}; \quad (2.66)$$

Ланка $k_2 \cdot r_2$:

$$k_2 \cdot r_2 = 0,44 \cdot 0,034 = 0,015; \quad (2.67)$$

Ланка $\frac{3}{2} \cdot p_{\text{п}} \cdot k_2$:

$$\frac{3}{2} \cdot p_{\text{п}} \cdot k_2 = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 0,44 = 0,66; \quad (2.68)$$

Ланка $\frac{1}{J \cdot p}$:

$$\frac{1}{J \cdot p} = \frac{1}{1,3 \cdot p} = 0,077 \cdot \frac{1}{p}; \quad (2.69)$$

Ланка $\frac{1}{1 + T_2 \cdot p}$:

$$\frac{1}{1+T_2 \cdot p} = \frac{1}{1+0,034 \cdot p}; \qquad (2.\ 70)$$

Ланка $\frac{1/R`_1}{1+T`_1 p}$:

$$\frac{1/R`_1}{1+T`_1 p} = \frac{1/0,037}{1+0,0097p} = \frac{27,03}{0,0097p+1}; \qquad (2.71)$$

2.7.2 Синтез математичної моделі векторної системи керування ПЧ

Структурна схема моделі асинхронного двигуна засобами Simulink наведена на рисунку 2.11. Остання зібрана згідно з розрахованою структурною схемою асинхронного двигуна (рис.2.10).

На рис.2.11 прийнято наступні позначення: 10, 17, 20, 30 – блоки додавання та віднімання; 12, 14, 21, 24 – блоки множення; 22 – блок помноження та ділення; 9, 15 – блоки вхідних значень напруг u_{1u}, u_{1v}, із системи керування двигуном (рисунок 2.5); 3, 19 – блоки вихідних значень струмів i_{1u}, i_{1v} у систему керування двигуном; 5 – блок завдання вихідного значення вектора потокозчеплення ψ_{2u}; 6 – блок масштабу потокозчеплення; 26 – блок масштабу моменту; 27 – блок масштабу швидкості; 28 – блок вихідного значення швидкості; 29 – завдання моменту опору із системи керування; 11, 13 – блоки завдання еквівалентної індуктивності розсіювання двигуна $L`_1 = 0,00036\,\text{Гн}$; 34 – блок завдання максимальної взаємної індуктивності між статором і ротором $L_m = 0,00025\,\text{Гн}$; 18 – блок завдання коефіцієнту електромагнітного зв'язку ротору $k_2 = 0,44$; 2, 16 – передатна функція ланки

$(1/R_1^{`})/(1+T_1^{`}p)=27,03/(0,0097p+1)$; 23 – передатна функція ланки $k_2\cdot r_2=0,015$; 25 – передатна функція ланки $(3/2)\cdot p_п\cdot k_2=0,66$; 31, 32 – передатна функція ланки $1/(Jp)=0,077/p$; 4 – передатна функція ланки $k_2/T_2=12,9$; 33 – блок завдання кількості пар полюсів асинхронного двигуна $p_п=1$; 8 – засіб відображення перехідних процесів (осцилограф); 7 – блок об'єднання сигналів, для їхнього наступного відображення на осцилографі 8.

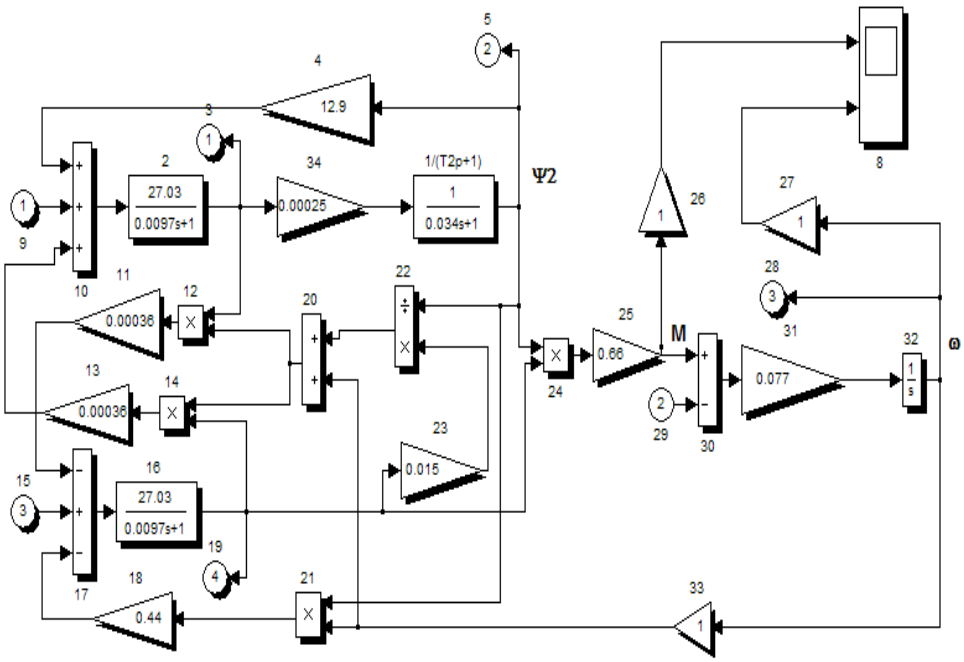


Рисунок 2.11 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна

Структурна схема моделі системи векторного керування асинхронним двигуном наведена на рис.2.12, а структурна схема моделі асинхронного двигуна відповідно на рис.2.11. На рис.2.12 модель асинхронного двигуна об’єднана у окрему підсистему (блок 11).

На структурній схемі (рис.2.12) прийняті наступні позначення блоків: 1 – блок завдання потокозчеплення; 2 – передатна функція контуру потокозчеплення; 3,22 – блоки підсистем регуляторів струму; 4 , 7, 17, 19 – блоки передатних функцій ланок W1-W4; 11 – блок підсистеми моделі асинхронного двигуна, модель якого зображена на рис.2.13. 9,15 – вхідні сигнали напруг u_{lu}, u_{lv}, 29 – вхідне значення моменту опору, 3,19 – вихідні значення

струмів i_{lu} та i_{lv}, 5 – вихідне значення потокозчеплення, 28 – вихідне значення швидкості; 10 − блок завдання моменту опору; 6,24 – передатна функція тиристорного перетворювача; 5, 23 – блоки додавання та віднімання; 13, 16, 18 – блоки множення; 9,12 − коефіцієнти регулятору струму $k_c = 0,0042$; 14 − коефіцієнт підсилення регулятора швидкості $k_ш = 0,032$; 21 − підсистема регулятору швидкості.

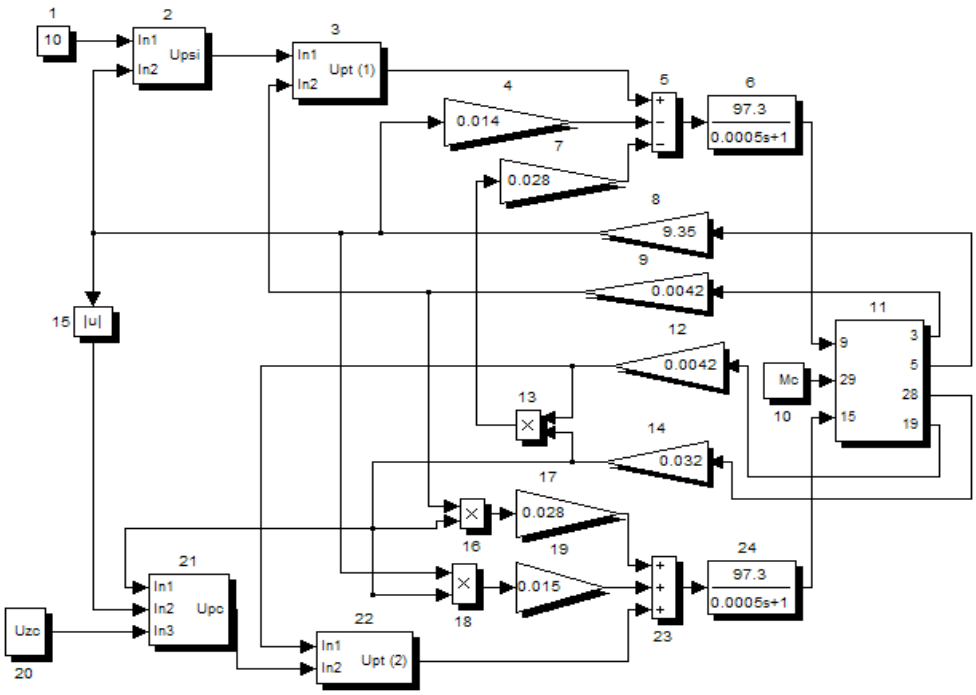


Рисунок 2.12 – Структурна схема моделі системи керування

Структурна схема моделі контуру потокозчеплення двигуна наведена на рисунку 2.13.

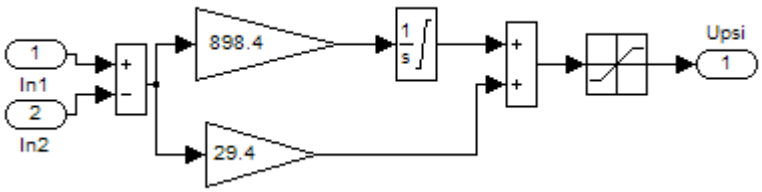


Рисунок 2.13 – Структурна схема моделі контуру потокозчеплення двигуна

Таким чином, ми розділили канали керування швидкістю та потокозчепленням. Об’єкт керування характеризується наявністю нелінійних перехресних зв’язків між каналами керування. Для їх компенсації у систему автоматичного регулювання введені нелінійні зв’язки, що відтворюють функціональні залежності, зворотні залежностям об’єкта керування. Цим забезпечено задані динамічні характеристики системи автоматичного регулювання, а в деяких випадках і її стійкість.

Перетворювач частоти представлений двома безперервними аперіодичними ланками у системі відліку, що пов’язана з вектром потокозчеплення ротора. Тому у електроприводі немає необхідності здійснювати пряме та зворотнє перетворення координат, що присутнє у реальному електроприводі.

Структурна схема контурів струму наведена на рисунку.2.14.

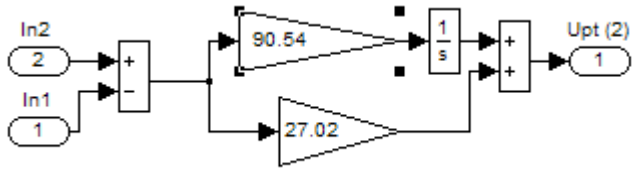


Рисунок 2.14 – Структурна схема контуру струму

Структурна схема моделі контуру швидкості наведена на рис.2.15.

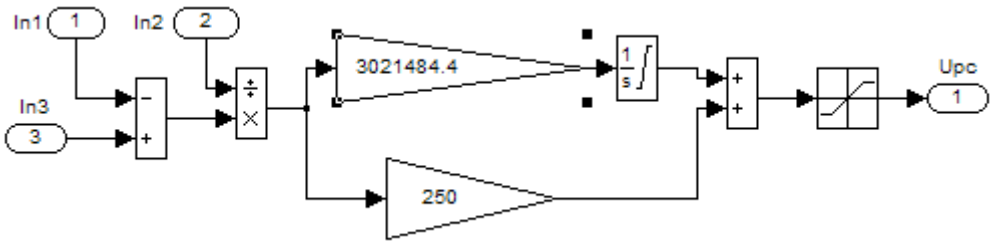


Рисунок 2.15 – Структурна схема моделі контуру швидкості

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна АИР 315S2 (IM 1081) зі швидкості 3000 об/хв., при номінальному струмі навантаженні 293,4А наведені на рисунку 2.16.

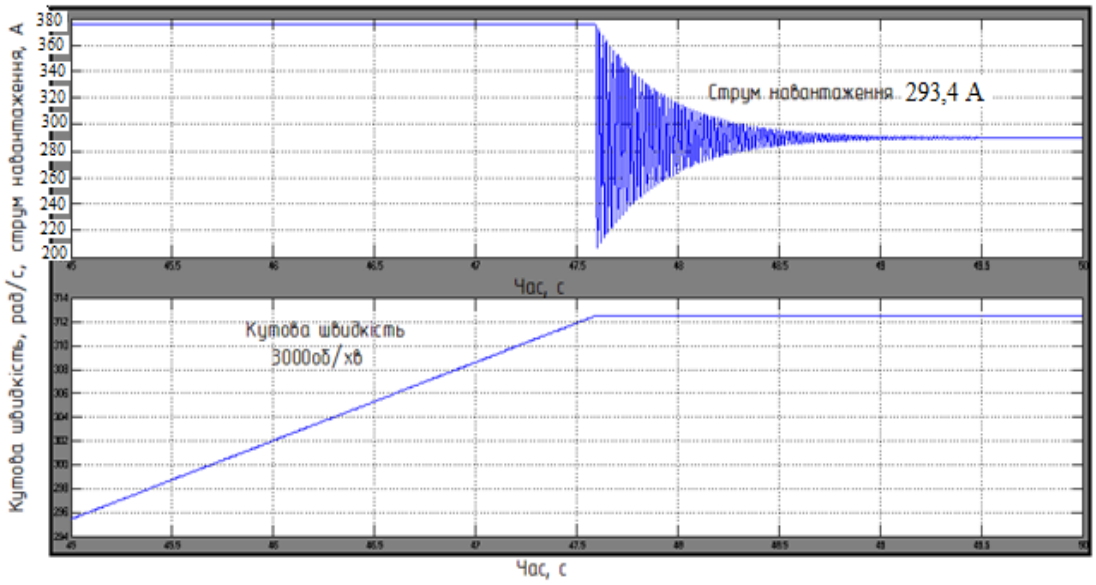


Рисунок 2.16 – Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна у номінальному режимі

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна АИР 315S2 (IM 1081) зі швидкості 1500об/хв., при струмі навантаження 0,75In наведені на рисунку 2.17.

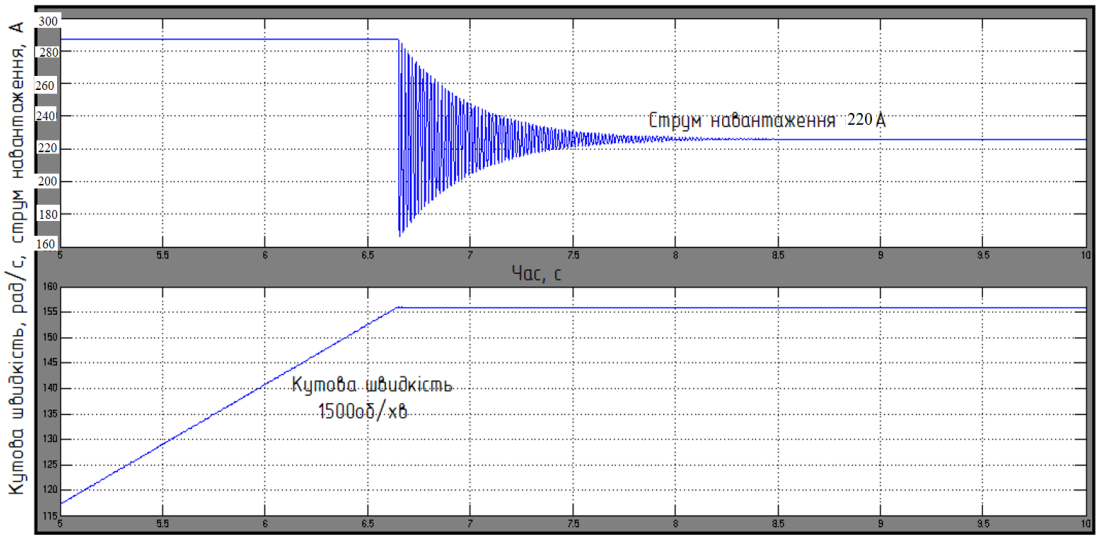


Рисунок 2.17– Графіки перехідних процесів при пуску двигуна (1500об/хв і 225А)

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна АИР 315S2 (IM 1081) зі швидкості 750об/хв., при струмі навантаження 225А наведені на рисунку 2.18

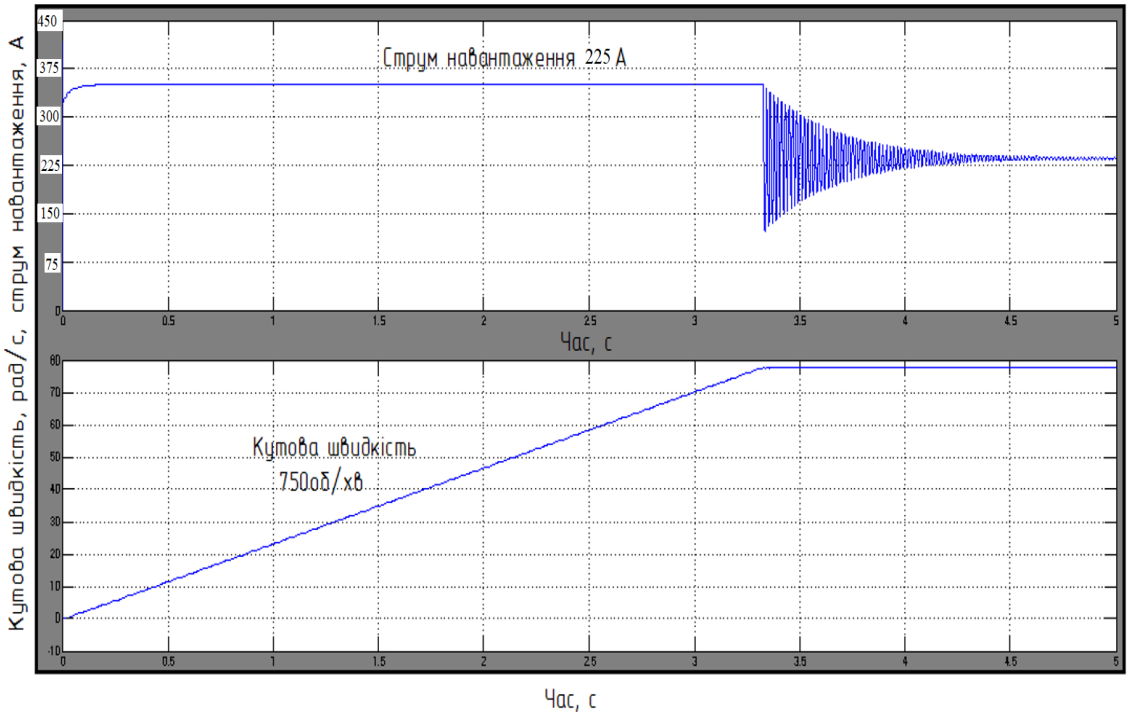
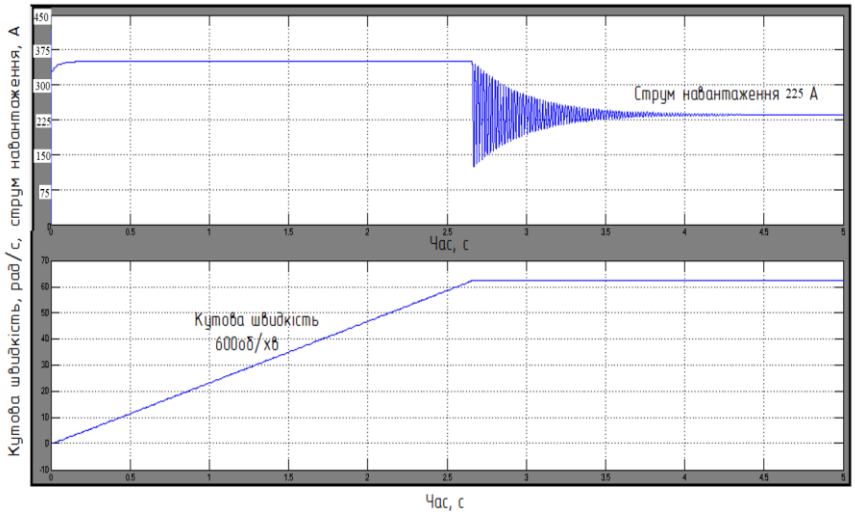


Рисунок 2.18– Графіки перехідних процесів при пуску двигуна (0,5Ін)

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна АИР 315S2 (IM 1081) зі швидкості 600об/хв., при струмі навантаження 225А наведені на рисунку 2.19.



Рисунку 2.19 – Графіки перехідних процесів при пуску двигуна (0,75Ін)

Визначемо швидкодію системи керування електроприводом:

- з рисунку 2.16 – час перехідного процесу 47,75с.;
- з рисунку 2.17 – час перехідного процесу 6,8с.;
- з рисунку 2.18 – час перехідного процесу 3,3с.;
- з рисунку 2.19 – час перехідного процесу 2,6с.

Можна зробити висновок, що зменшення навантаження на валу досліджувального електродвигуна зі 100% до 75% від номінального призводить до автоматичного зростання швидкодії електроприводу на 55% при регулюванні швидкості від 3000 об/хв до 600 об/хв.

2.8. Енергозбереження

2.8.1 Загальні відомості

Енергозбереження в будь-якій сфері зводиться до зниження марних втрат енергії. Аналіз втрат у сфері виробництва, розподілу і споживання електроенергії показує, що велика частина втрат (до 90%) приходиться на сферу енергоспоживання, тоді як втрати при передачі електроенергії складають лише 9–10%. З цього стає ясно, що основні зусилля по енергозбереженню повинні бути сконцентровані саме в сфері споживання електроенергії.

Структуру споживачів електроенергії можна представити в такий спосіб: електроприводи – 62%, електричний транспорт – 9%, електротермія і електротехнологія – 8%, освітлення та інші споживачі – 21%.
За даними європейських експертів вартість електроенергії, споживаної щорічно середнім двигуном у промисловості, майже в 5 разів перевершує його власну вартість. Очевидно, що за час служби двигуна (десятки років) енергетична складова незрівнянно вище складової, зв'язаної з капітальними витратами, у зв'язку з чим турбота про оптимізацію саме енергетичної складової є особливо важливою.

Сучасний рівень розвитку силової електроніки, мікропроцесорних засобів керування і контролеві, засобів автоматичного регулювання дозволяє широко використовувати ці технічні досягнення для рішення задач енергозбереження. Застосування сучасних способів регулювання швидкості технологічних механізмів у сполученні із широкими можливостями автоматизації може забезпечити оптимальне використання енергетичних ресурсів.

Приклад цьому є заміна парової турбіни, яка використовує дорогу енергію пара, на електродвигун з регульованим числом обертів.

Застосування частотного перетворювача дозволить здійснювати плавний пуск електродвигуна, що понизить пускові навантаження на обмотку електродвигуна і механізм газодувки, запобіжить короткочасній посадці напруги в мережі заводу.

2.8.2 Компенсація реактивної потужності

Робота більшості електроприймачів змінного струму супроводжується споживанням реактивної енергії (потужності) й характеризується коефіцієнтом потужності ($\cos\varphi$). Усереднені значення $\cos\varphi$ для систем електропостачання різноманітних підприємств приведені нижче. На практиці коефіцієнт потужності підприємства визначається договором на його електропостачання і повинен знаходитися у межах 0.93…0.99. Циркуляція реактивної потужності між системою електропостачання і електроприводом супроводжується втратами потужності. У зв’язку з цим зниження рівня цієї потужності, що називається зазвичай компенсацією реактивної потужності, визначає одну з можливостей енергозбереження. Крім того, проходження реактивної потужності знижує пропускну здатність усіх елементів системи електропостачання й призводить до додаткового падіння напруги в лініях електропередач і трансформаторах. Таким

чином, компенсація реактивної потужності являє собою важливу економічну задачу.

2.8.3 Засоби компенсації реактивної потужності

До таких засобів відносяться конденсаторні батареї, синхронні двигуни, синхронні компенсатори й фільтрокомпенсуючі пристрої. Конденсаторні батареї є основним засобом компенсації реактивної потужності при робочих напругах до 6кВ і практично не мають обмежень за потужністю. Вони характеризуються простотою при монтажу і експлуатації, безшумністю в роботі, відносно невисокою вартістю, можливістю встановлення практично в будь-якому приміщенні, малими питомими власними втратами потужності на рівні 0.0025…0.005кВт/квар.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Дана магістерська робота передбачає модернізацію електропривода мережевого насоса в умовах котельної № 1.

В даному розділі розглянуті основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори дільниці, а також розроблені заходи для їхнього усунення, крім цього узагальнені питання пожежної профілактики. Особливу увагу приділено питанням охорони навколишнього середовища.

3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки

Котельня – це приміщення, будівля, споруда чи їх комплекс, у яких розміщено сукупність обладнання та пристроїв (у тому числі теплогенератори на основі водонагрівачів, допоміжне устаткування), призначені для вироблення теплової енергії та подавання її теплоносію (водяна пара або гаряча вода) з метою теплозабезпечення споживачів.

Визначимо у відповідності до ДСН 3.3.6.042-99 [34] категорії важкості робіт у котельні за енерговитратами.

Категорія важкості робіт наладчика електрообладнання відноситься до категорії IIа і являє собою роботу пов'язану з ходінням, переміщенням дрібних (до 1 кг) виробів або предметів в положенні стоячи або сидячи і потребують певного фізичного напруження.

Загальні енерговитрати організму робітника даної категорії робіт 176-232 Вт (151-200 ккал/год.).

Оптимальні і фактичні параметри метеоумов згідно ГОСТ 12.1.005-88 [35] та ДСН 3.36.042-99 [34] приводяться в таблиці 3.1. Фактичні параметри метеоумов – в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Допустимі і оптимальні параметри мікроклімату для робочої зони

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с, не більше	
		Оптимальна	Допустима	Оптимальна	Допустима	Оптимальна	Допустима
Холодний	IIа	19-21	17-23	40-60	75	0,2	<0,3
Теплий	IIа	21-23	18-27	40-60	65 при 27 °С	0,3	0,2-0,4

Таблиця 3.2 – Фактичні параметри метеоумов в робочій зоні

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с, не більше
Холодний	IIа	20-22	40-60	0,1
Теплий	IIа	21-23	50-60	0,3

Як видно з таблиць 3.1 і 3.2 параметри мікроклімату досліджувальної ділянки мають задовільні значення.

Відповідно ДСН 3.3.6.037-99 [36] визначимо нормативну інтенсивність теплового опромінювання в приміщенні.

Для профілактики перегрівання працюючих в умовах нагріваючого мікроклімату організовують раціональний режим праці та відпочинку.

При мікрокліматичних умовах, що перевищують допустимі параметри, внутрішньозмінний режим праці та відпочинку організовують за рахунок тривалості робочого часу:

- при поєднанні температури повітря, що перевищує допустимий рівень, з відносною вологістю, яка перевищує 75 %, тривалість регламентованих перерв рекомендується встановлювати не менше 20 % робочого часу;

- при інтенсивності теплового опромінення понад 350 Вт/м^2 та опроміненні понад 25 % поверхні тіла тривалість безперервної роботи і регламентованих перерв встановлюється у відповідності з даними, наведеними в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Допустима тривалість безперервного інфрачервоного опромінення та регламентованих перерв протягом години

Інтенсивність ІЧ опромінювання, Вт/м^2	Тривалість безперервних періодів опромінювання, хв.	Тривалість перерв, хв.	Сумарне опромінювання протягом зміни, %
350,0	20,0	8,0	до 50
700,0	15,0	10,0	до 45
1050,0	12,0	12,0	до 40
1400,0	9,0	13,0	до 30
1750,0	7,0	14,0	до 25
2100,0	5,0	15,0	до 15
2450,0	3,5	12,0	до 15

Небезпечні і шкідливі виробничі чинники відповідно до ГОСТ 12.0.003–74 [38] підрозділяються за прикладом дії на фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні, а також чинники трудового процесу, які характеризують тяжкість і напруженість праці.

Основними шкідливими виробничими чинниками котельні шкідливі хімічні речовини, пил, шум, електричний струм, теплове опромінення.

У котельні проявляють свою токсичну дію багато шкідливих хімічних виробничих чинників. Так, у районі нагрівальних пристроїв виникає загазованість, обумовлена використанням газового палива і поширенням газів в колопічному просторі. У котельні використовують горючі і

вибухонебезпечні речовини: для опалювання нагрівальних пристроїв горючі гази, мазут; для мастила устаткування – різні змащувальні матеріали.

Оцінюючи параметри запиленості котельні, слід звернути увагу, що пил гігієнічно шкідливий з огляду впливу на організм людини. Найбільш небезпечними вважаються частинки розмірів від 3 -10 мкм, які потрапляючи в легені при диханні затримуються в них і накопичуються. Що призводить до захворювань. За ГОСТом 12.1.005-88 [35] нормуються гранично допустимі концентрації різного пилу в робочій зоні. ГДК пилу різного походження коливаються від 1 до 10 мг/м^3. Вміст пилу у приміщенні для обслуговування поста керування 1,5 мг/м^3, у приміщенні електрообладнання 0,75 мг/м^3.

Шум на дільниці є причиною швидкого стомлення працівників, що призводить до зниження продуктивності праці і збільшення браку, причому зниження продуктивності праці тим більше, чим складніше трудовий процес і чим більше у ньому елементів розумової праці. Нормування рівнів шуму здійснюється відповідно до ДСН-3.3.6.037-99[36]. Основою нормування є обмеження звукової енергії, яка діє на працівника протягом робочої зміни, значеннями безпечними для її здоров'я і працездатності. Шум в приміщені згідно з нормами не перевищує 55 дБА.

Працівники котельні піддаються впливу вібрації, гігієнічна оцінка вібрації здійснюється згідно з ДСН-3.3.6.039-99[37]. Генерується вібрація ручним інструментом, механізмами і сприймається тілом людини при безпосередньому контакті.

Таблиця 3.4 - Допустимі значення нормованих параметрів локальної вібрації

Середньогеометричні частоти октавних смуг, Гц	Допустимі значення нормованих параметрів локальної вібрації			
	віброприскорення		віброшвидкість	
	м/с^2	дБ	м/с*10^2	дБ
63	5,4	85	1,4	109
125	10,7	91	1,4	109

Таблиця 3.5 - Фактичні значення нормованих параметрів локальної вібрації

Середньогеометричні частоти октавних смуг, Гц	Допустимі значення нормованих параметрів локальної вібрації			
	віброприскорення		віброшвидкість	
	м/с^2	дБ	м\с*10^2	дБ
63	5,2	80	1,3	105
125	10,5	90	1,3	105

Фактичні показники вібрації, як видно з таблиць (3.4 та 3.5) не виходять за рамки допустимих показників.

Згідно ДБН В.25-28-2006 [39] робота наладчика електрообладнання відноситься до V розряду зорової роботи, який характеризується роботою малої точності.

Параметри природного і штучного освітлення приведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Параметри природного і штучного освітлення

Розряд зорової роботи	Природне освітлення			Штучне освітлення			
	Район по ресурсам світового клімату	m, коеф. світового клімату	КЕО, N, %	Освітленність,Е, лк		Пок. освітленості Р	Коеф пульс., %
				Нормативне значення	Фактичне значення		
V	1	1	3	200	350	40	20

При освітленні приміщення цеху використовують природне освітлення та штучне, яке здійснюється електричними лампами, і комбіноване, при якому у світлий час доби недостатнє освітлення доповнюється штучним.

По небезпеці поразки електричним струмом, згідно НПАОП 40.1-1.32-01 [40] дільниця відноситься до приміщення без підвищенної безпеки. Електричне обладнання є потенційно небезпечним для працюючих, оскільки органи відчуття людини на віддалі не можуть виявити електричну напругу.

Класифікація виробничих приміщень за електробезпекою наведена в таблиці 3.7.

Приміщення дільниці за ступенем небезпеки ураження людей відповідно таблиці 3.7 належить до 1 класу.

Таблиця 3.7 – Класифікація виробничих приміщень за електробезпекою

Приміщення за ступенем ураження	Вологість, %	Температура, °С	Клас
Приміщення без підвищенної безпеки	40-60	20-28	1
Приміщення з підвищеною безпекою	Більша 75	Більша 35	2
Приміщення особливо небезпечні	Близько 100		3

Згідно НАПБ Б.03.002-2007 [41] дільниця відноситься до категорії Д пожежо-вибухонебезпеки виробництва. Будівлю котельні побудовано з негорючих матеріалів (металоконструкцій, цегли, залізобетону, скла і ін.) і, згідно ДБН В.1.1-7-2002 [42], вона має II ступінь вогнестійкості. Ступінь вогнестійкості будинку визначається межами вогнестійкості його будівельних конструкцій і межами поширення вогню по цих конструкціях.

Пожежна безпека котельних установок при їх проектуванні та експлуатації забезпечується дотриманням протипожежних вимог, викладених у будівельних нормах і правилах з проектування котельних установок і Правила пристрою і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів.

Якщо пожежа загрожує котельні або виник в самій котельні, слід прийняти міри до повної зупинки котлів та попередження їх вибуху, для чого необхідно закрити запірний запобіжний клапан, засувку на вводі, а також усі крани і засувки; відкрити крани продувних свічок і вжити заходів до гасіння вогню; закрити шибер за котлом; закрити вікна і двері; якщо котел паровий, вимкнути живильний насос; підняти запобіжні клапани і заклинити їх, щоб вони не могли закриватися і забезпечували випуск пари в атмосферу; викликати пожежну команду.

На випадок пожежі в котельні є наступний протипожежний інвентар: вогнегасники ОП-5 (один на кожну топку), ящик місткістю 0,5 м^3 з сухим піском і дві сталеві лопати, повсть або ковдру, шланг для водопровідного крана. Вогнегасники, якими оснащен об'єкт, відповідають вимогам ДСТУ 3675-98 або ДСТУ 3734-98 (ГОСТ 30612-99) та ГОСТ 12.2.037-78, технічних умов, експлуатаційних документів виробників і сертифіковані в Україні в установленому порядку.

Вибух газів може відбутися в топці або у верхній частині газоходів. При вибуху газів в газоходах підвищується тиск і можливі випадки руйнування обмурівки, а в топці відбувається викидання полум'я з оглядового і завантажувального отворів при відкритій топкових дверцятах або крізь щілини при закритих дверцятах, що піддає небезпеці обслуговуючий персонал котельної. У разі вибуху газів в топці або газоходах котла обслуговуючий персонал зобов'язаний негайно зупинити роботу і доповісти про це особі, відповідальній за котельню.

Парові котли, що працюють під тиском понад 0,07 МПа, з температурою води понад 115 ° С як найбільш небезпечні розміщують в окремо розташованих одноповерхових будівлях. Сюди відносяться котельні установки промислових підприємств та котельні районних систем теплопостачання.

У вбудованих у виробничі або багатоповерхові будинки іншого призначення котелень допускається застосовувати прямоточні котли продуктивністю пара до 4 т / год, водотрубні і газотрубні котли з поверхнею нагріву не більше 30 м^2, з робочим тиском не вище 0,8 МПа і вмістом води не більше 50 л на 1 м^2 поверхні нагрівання, а також парові котли, для яких добуток тиску на число квадратних метрів поверхні нагрівання не перевищує 20.

Опалювальні котельні з водяними або паровими котлами низького тиску часто розміщують в підвалах будівель, але з певними обмеженнями. Зокрема, не можна встановлювати котли під видовищними приміщеннями,

приміщеннями зі значним скупченням людей, під груповими кімнатами дитячих установ і під класами загальноосвітніх шкіл. Не можна розташовувати котельні, що працюють на газоподібному паливі, під приміщеннями, в яких може одночасно перебувати більше 50 чол. (Торговельні та обідні зали, гардеробні, фойє, під глядацькими залами і сценами видовищних підприємств, роздягальнями та мильними лазень і т. Д.). Крім того, котельні не повинні вбудовуватися в лікарняні будівлі та примикати до житлових приміщень.

Стіни, перекриття та покриття окремо розташованих та вбудованих котелень повинні виконуватися з негорючих матеріалів. Лише в котельнях з поверхнею нагріву котлів до 450 м^2 можна влаштовувати згорає покриття, якщо воно знаходиться на висоті 0,7 м від обмурівки котлів. Горищні перекриття над приміщеннями котельних не влаштовують. Покриття будівель котелень при котлах високого тиску роблять або легко-скидали (власна маса 1 м^2 конструкцій повинна бути до 90 кг) або зі світловими і вентиляційними ліхтарями площею не менше 10% площі підлоги, зайнятої котлами. В останньому випадку замість ліхтарів можна влаштовувати засклені прорізи у стінах тієї ж площадки. Враховуючи, що пожежна небезпека котелень при застосуванні пилоподібного палива (вугільної, торф'яної пилу) збільшується, сумарна площа засклених прорізів, площа світлових і вентиляційних ліхтарів в цьому випадку повинна бути не менше 30% від площі однієї з зовнішніх стін.

З приміщень котелень влаштовують не менше двох виходів назовні, розташованих в протилежних сторонах. При площі підлоги менше 200 м^2 і довжині фронту котлів (тільки водотрубних і газотрубних) не більше 12 м допускається влаштування одного виходу назовні. Двері з котелень в службові, побутові, а також допоміжні виробничі приміщення повинні відкриватися в бік котельної.

При розміщенні водяних і парових котлів низького тиску в підвалах перекриття над підвалом має бути неспаленим з межею вогнестійкості не

менше 1 год. Вхід в таку підвальну котельню влаштовують окремим, при цьому він не повинен сполучатися з сходовою кліткою загального користування.

3.2 Заходи поліпшення умов праці

3.2.1 Розрахунок захисного заземлення

Враховуючи особливості розташування котелень, контур захисного заземлення розташовується паралельно вздовж стіни будівлі приміщення на відстані 1 м від неї.

Як заземлювачі використовуються сталеві куточки 50 х 50 і завдовжки 2,5 м, зварєні між собою цільною смугою за допомогою електричної зварки.

Заземляючий пристрій використовується для мережі до 1000В. При використанні даного типу заземлення потрібно врахувати, що опір заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

Опір визначається по формулі:

$$R_j = \frac{125}{J_j}, \tag{3.1}$$

де Jj – ємнісний струм однофазного КЗ на землю, А.

$$J_j = \frac{U \cdot (35 \cdot l_x + l_b)}{350} = \frac{6{,}5 \cdot (35 \cdot 20)}{350} = 13 \text{ А}, \tag{3.2}$$

де U – лінійна напруга мережі, кВ; l_x – сумарна довжина електрично зв'язаних між собою кабельних ліній; l_b - сумарна довжина електрично зв'язаних між собою повітряних ліній, км.

Так як заземлення використовується для мережі 0,4кВ з глухозаземленою нейтраллю, то згідно ПУЕ [31] його значення повинне бути Rj = 4Ом. Розрахунковий опір грунту під цехом η = 100 Омм. Уточнюючий коефіцієнт, для 3-й кліматичної зони, для вертикальних електродів φ = 1,5.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$P_{роз} = \varphi \cdot \eta = 1,5 \cdot 100 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \tag{3.3}$$

де φ – коефіцієнт, що підвищує; η – розрахунковий опір ґрунту.

Опір розтікання струму одиночного вертикального заземлення:

$$R_{ob} = (\frac{\eta \cdot 0,366}{l}) \cdot (Lg\frac{2 \cdot l}{d_e}) + \frac{1}{2} Lg(4 \cdot t + \frac{l}{4} \cdot t - l) =$$
$$= (\frac{150 \cdot 0,366}{2,5}) \cdot (Lg\frac{2 \cdot 2,5}{0,0475}) + \frac{1}{2} Lg(4 \cdot 1,95 + \frac{2,5}{4} \cdot 1,95 - 2,5) = 47,6 \text{ Ом}, \tag{3.4}$$

де l = 2,5 м – довжина стрижня; d_e = 0,0475 м – еквівалентний діаметр дільничного заземлення; t – глибина закладки стрижня від поверхні ґрунту $t = 0,71 \cdot 2,5 / 2 = 1,95$ м.

Відстань між електродами приймаємо рівною 4 м. Кількість електродів, необхідної для виконання контуру заземлення :

$$n^* = l^* / 4 = 350 / 4 = 88 \text{ шт.} \tag{3.5}$$

Відношення відстані між заземлювачами до їх довжини:

$$a / l = 4 / 2,5 = 1,6 \qquad (3.6)$$

По одержаних (n*) та (a/l), визначимо коефіцієнт використання вертикальних електродів: $n_{втн} = 0,33$.

Опір розтікання струму горизонтальної смуги:

$$R_{ог} = (\frac{150 \cdot 0,366}{350}) \cdot Lg(\frac{2 \cdot 350 \cdot 350}{0,04 \cdot 0,7}) = 1,08 \text{ Ом.}$$

При (n = 88) й (a/l =1,6) коефіцієнт використання смуги складає 0,33.

Опір комбінованого заземлення :

$$R_j = \frac{47,6 \cdot 1,08}{0,33 \cdot 47,6 + 88 \cdot 0,38 \cdot 1,08} = 0,9 \text{ Ом.}$$

У даному розрахунку заземлення ми визначили розміри і кількість заземлюючи елементів і опір комбінованого заземлення склав 0,9 Ом, що менше значення, заданого в ПУЕ - Rj = 4 Ом.

3.3 Охорона навколишнього середовища

Основними забруднюючими речовинами, що утворюються в процесі енергетичного використання палива, є оксиди азоту (NOx), оксид вуглецю (CO), оксиди сірки (SO_x), сполуки хлору та тверді частки.

Окис вуглецю CO – високотоксична речовина, яка добре реагує з гемоглобіном, що призводить до отруєння організму.

Найбільші викиди супроводжують роботу бензинових і дизельних двигунів та підприємств чорної металургії.

Питомі викиди CO при спалюванні природного газу в котлах малої потужності достатньо високі, в порівнянні з роботою великих котлоагрегатів. Це призводить до суттєвої нерівномірності викидів і збільшення концентрації CO в густонаселених місцях. Зменшення викидів CO досягається покращенням сумішоутворення та рівномірним розподілом температур в топці.

Слід відзначити, що більшість методів стримування утворення NO_x призводять до підвищення концентрації CO у відхідних газах. Винятком є методи вприскування води і пари, оскільки введення додаткової кількості H_2O призводить до утворення надлишкових радикалів OH і покращення окиснення CO.

Канцерогенні речовини, що, в основному, виділяються при спалюванні палива можна показати на прикладі бензопірену C_20H_{12} . Цей вуглеводень утворюється при різкому охолодженні димових газів під час піролізу метану при температурі більше 600 °C.

Процеси утворення канцерогенних речовин напряму пов’язані із погіршенням якості спалювання та сажоутворенням. Крім того, відомо, що утворення C_20H_{12} відбувається на поверхні частинок золи та сажі.

Викид канцерогенних речовин суттєво залежить від виду палива: при спалюванні природного газу він в 10 разів менший, ніж для твердого палива, а залежність вмісту бензопірену від надлишку повітря в топці має екстремальний характер, мінімум якого відповідає $\alpha \approx 1{,}10$ [45].

Перелік основних забруднюючих речовини в продуктах згоряння та їх вплив на клімат, навколишнє середовище та здоров’я людей наведений у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Основні компоненти продуктів згоряння та їх вплив на клімат, навколишнє середовище та здоров'я людей

Компонент	Джерело утворення	Екологічний вплив
Оксид вуглецю (CO)	Неповне згоряння всіх видів паливної біомаси	Клімат: Газ непрямої парникової дії (ГНПД), впливає на утворення озону Здоров'я: Може викликати напади задухи у разі накопиченім в закритих приміщеннях
Тверді частки	Сажа та конденсат важких вуглеводнів (дьоготь), що утворюються при неповному згорянні усіх видів паливної біомаси. Золові частки	Клімат і навколишнє середовище: Зворотний парниковий ефект через утворення аерозолів. Непрямий ефект - можливий значний вміст важких металів у завислих частках Здоров'я: Негативний вплив на систему органів дихання людини
Оксиди азоту (NO_x = NO + $N0_2$)	Побічний продукт згоряння всіх видів паливної біомаси. За певних умов додаткова кількість NOx може утворюватися з азоту повітря	Клімат і навколишнє середовище: Непрямий парниковий ефект через вплив на утворення озону. Зворотний парниковий ефект через утворення аерозолів. Кислотні опади. Призводить до загибелі рослинності. Утворення смогу Здоров'я: Негативний вплив на систему органів дихання людини
Оксиди сірки ($S0_X$=$S0_2$ + $S0_3$)	Побічний продукт згоряння всіх видів паливної біомаси, що містять сірку	Клімат і навколишнє середовище: Зворотний парниковий ефект через утворення аерозолю. Кислотні опади. Призводить до загибелі рослинності. Утворення смогу Здоров'я: Негативний вплив на систему органів дихання людини, викликають астму

З метою недопущення значного забруднення атмосферного повітря продуктами згоряння, необхідно здійснювати постійний контроль за викидами забруднюючих речовин, вживати заходи і застосовувати пристрої для їх ефективного вловлювання, знешкодження та утилізації, що дозволить дотримуватися встановлених санітарних нормативів допустимого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Характеристика об'єкта модернізації

Даною випускною магістерською роботою передбачається в умовах котельної модернізація застарілих двигунів постійного струму на нові двигуни змінного струму з частотними перетворювачами.

4.2 Розрахунок теплової схеми котельні у зимовий період

Система опалення живиться від водогрійної котельні.

Згідно розрахунку потужність системи опалення $Q_{оп} = 1,25$ МВт, система закрита, температура мережної води на виході з котельні 95°С, температура мережної зворотної води 70°С.

Таблиця 4.1 – Розрахунок теплової схеми котельні у зимовий період

Величина			Розмірність	Розрахунок
Найменування	Позначення	Формула або спосіб визначення		
1	2	3	4	5
Розрахункова потужність теплових споживачів	$Q_{тс}$	$Q_{тс} = Q_{оп}$	МВт	1,25
Розрахунок витрати мережної води для потреб теплових споживачів	$G_{мв}$	$\frac{Q_{тс}}{Cp\left(t^{I}_{мв} - t^{II}_{мв}\right)}$	кг/с	$\frac{1,25 \cdot 10^3}{4,19(95-70)} = 11,93$
Витрата добавочної води	$G_{доб}$	$G_{підж} = \alpha_{втр} \cdot G_{мв}$	кг/с	$0,0001 \cdot 11,93 = 0,001193$

Продовження табл.4.1

1	2	3	4	5
Витрата зворотної мережної води	$G_{змв}$	$G_{мв} - G_{підж}$	кг/с	$11,93 - 0,001193 = 11,92$
Витрата води в перепускній лінії	$G_{пер}$	$\frac{G_{мв} \cdot Cp(t_к^{II} - t_{мв}^{I})}{Cp(t_к^{II} - t_{мв}^{II})}$	кг/с	$\frac{11,93 \cdot 4,19(95-95)}{4,19(95-70)} = 0$
Витрати води перед мережним насосом (МН)	$G_{мн}$	$G_{мв} \cdot (1 - \alpha_{втр})$	кг/с	$11,93 \cdot (1 - 0,0001) = 11,92$
Витрата мережної води в котлах	$G_к$	$G_{мн} - G_{пер} + G_{рец}$	кг/с	$11,92 - 0 + 0 = 11,92$
Визначимо потужність водогрійного котла	$Q_{вк}$	$G_{вк} \cdot Cp \cdot (t_к^{II} - t_к^{I})$	МВт	$11,92 \cdot 4,19 \cdot (95-70) = 1248 = 1,25$
Витрата робочого палива на котел	$B_р$	$\frac{Q_{вк}}{\eta_к \cdot Q_н^р}$	м^3/с	$\frac{1,25}{0,92 \cdot 34,842} = 0,03899$

4.3 Розрахунок теплової схеми котельні в середньоопалювальному періоді

Таблиця 4.2 – Розрахунок теплової схеми котельні в середньоопалювальному періоді

Найменування	Позначення	Спосіб визначення	Розмірність	Розрахунок
1	2	3	4	5
Розрахункова потужність теплових споживачів	$Q_{тс}$	$Q_0^{max}\left[\left(t_в - t_з\right)/\left(t_в - t_{зо}\right)\right]$	МВт	$1,25\cdot\left[\frac{(20-0,1)}{(20-(-21))}\right]= 0,607$
Розрахунок витрати мережної води для потреб теплових споживачів	$G_{мв}$	$\frac{Q_{тс}}{Cp\left(t^I_{мв} - t^{II}_{мв}\right)}$	кг/с	$\frac{0,607\cdot 10^3}{4,19(61-49)} = 12,07$
Температури в подавальному трубопроводі мережі	τ_1	$t_{вр} + \Delta t_0\cdot\left(\frac{Q_0^{'}}{Q_0}\right) + +(\Delta\tau_0 - 0,5\cdot\theta_0)\cdot \cdot\left(\frac{Q_0^{'}}{Q_0}\right)/\left(\frac{G_0^{'}}{G_0}\right)$	$^\circ C$	$20 + 62,5\cdot\left(\frac{0,607}{1,25}\right)^{0,8} + +(25 - 0,5\cdot 25)\cdot \cdot\left(\frac{0,607}{1,25}\right)/1 = 61$
Температури в зворотному трубопроводі мережі	τ_2	$t_{вр} + \Delta t_0\cdot\left(\frac{Q_0^{'}}{Q_0}\right)^{0,8} - 0,5\cdot \cdot\theta_0\cdot\left(\frac{Q_0^{'}}{Q_0}\right)/\left(\frac{G_0^{'}}{G_0}\right)$	$^\circ C$	$20 + 62,5\cdot\left(\frac{0,607}{1,25}\right)^{0,8} - -0,5\cdot 25\cdot\left(\frac{0,607}{1,25}\right)/1 = = 49$
Температурний напір опалювального приладу в розрахунковому режимі	Δt_0	$(t_{10} + \tau_0)/2 - t_в$	$^\circ C$	$(95+70)/2 - 20 = = 62,5$
Перепад температур мережної води для розрахункового режиму	$\Delta\tau_0$	$\tau_{10} - \tau_{20}$	$^\circ C$	$95 - 70 = 25$

Продовження таблиці 4.2.

1	2	3	4	5
Відносне теплове навантаження	θ	$t_{10} - \tau_{20}$	$^{\circ}C$	$95 - 70 = 25$
Витрата добавочної води на підживлення	$G_{\text{доб}}$	$0,0001 \cdot G_{\text{мв}}$	кг/с	$0,0001 \cdot 12,07 = 12,068$
Витрата зворотної мережної води	$G_{\text{змв}}$	$G_{\text{мв}} - G_{\text{підж}}$	кг/с	$12,07 - 0,001207 = 12,068$
Витрата води в перепускній лінії	$G_{\text{пер}}$	$\frac{G_{\text{мв}} \cdot Cp(t_{\text{к}}^{II} - t_{\text{мв}}^{I})}{Cp(t_{\text{к}}^{II} - t_{\text{мв}}^{II})}$	кг/с	$\frac{12,7 \cdot 4,19 \cdot (61-61)}{4,19 \cdot (61-49)} = 0$
Визначимо витрату води перед мережним насосом	$G_{\text{мн}}$	$G_{\text{мв}} \cdot (1 - \alpha_{\text{втр}})$	кг/с	$12,07 \cdot (1 - 0,0001) = 12,068$
Визначимо температуру води перед мережним насосом	$t_{\text{мн}}$	$[G_{\text{мв}} \cdot (1 - \alpha_{\text{втр}}) \cdot \text{t}_{\text{мв}}^{II}] / \text{G}_{\text{мн}}$	$^{\circ}C$	$[12,07 \cdot (1 - 0,001) \cdot 49] / 12,068 = 49$
Втрата води в перепускній лінії	$G_{\text{пер}}$	$G_{\text{мв}} \cdot (\text{t}_{\text{к}}'' - \text{t}_{\text{пр}}) / /(\text{t}_{\text{мв}}^{II} - \text{t}_{\text{мн}})$	кг/с	$12,07 \cdot (61-61) / \cdot / (49-49) = 0$
Витрата води на рециркуляцію	$G_{\text{рец}}$	$(\text{G}_{\text{мн}} - \text{G}_{\text{пер}}) \cdot (\text{t}_{\text{к}}' - \text{t}_{\text{мн}}) / /(\text{t}_{\text{к}}'' - \text{t}_{\text{к}}')$	кг/с	$(12,07 - 9,56) \cdot \cdot (49-49) / (61-49) = 0$
Витрата мережної води в котлах	$G_{\text{к}}$	$G_{\text{мн}} - G_{\text{пер}} + G_{\text{рец}}$	кг/с	$12,07 - 0 + 0 = 12,07$
Визначимо потужність водогрійного котла	$Q_{\text{вк}}$	$G_{\text{вк}} \cdot Cp \cdot (t_{\text{к}}^{II} - t_{\text{к}}^{I})$	МВт	$12,07 \cdot 4,19 \cdot \cdot (61-49) = 0,6068$
Витрата робочого палива на котел	$B_{\text{р}}$	$\frac{Q_{\text{вк}}}{\eta_{\text{к}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}$	м^3/с	$\frac{0,6068}{0,92 \cdot 34,842} = 0,0189$
ККД-брутто котельні	$\eta^{\text{бр}}$	$\frac{Q_{\text{вк}}}{B_{\text{р}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}$	%	$\frac{0,6068}{0,0039 \cdot 34,842} = 0,92$

На котельні встановлені 2 насоси мережної води VeroLine IPN-W 35 170-2 з подачею 120 м^3 /год, напором 40 м вод.ст., один насос є робочим, один резервиним.

Потужність електродвигуна мережного насоса:

$$N_{мн} = G_{мв} \cdot H_{мн} \cdot g / (\eta_н \cdot \eta_{ед}), \quad (4.1)$$

$$N_{мн}^{оп} = 12.07 \cdot 40 \cdot 9{,}81 / (\cdot 0{,}55 \cdot 0{,}96) = 8{,}97(кВт).$$

На котельні встановлено рециркуляційний насос VeroLine IPN-W 32 170-2 з подачею 25 м^3/год, напором 35 м вод.ст.

Потужність рециркуляційного насоса:

$$N_{рец}^{оп} = G_{рец}^{оп} \cdot H_{рец} \cdot g / (\eta_н - \eta_{ед}), \quad (4.2)$$

$$N_{рец}^{оп} = 11{,}92 \cdot 35 \cdot 9{,}81 / (0{,}55 \cdot 0{,}96) = 7{,}7 \text{ (кВт)}.$$

Для сирої води встановлено насос 1,5К – 8/19 з подачею 6 м^3/год, напором 0,203 МПа, ККД 0,44.

Потужність насоса сирої води:

– в опалювальний період:

$$N_{нсв}^{оп} = G_{дв}^{оп} \cdot H_{нсв} \cdot g / (\eta_н - \eta_{ед}), \quad (4.3)$$

$$N_{нсв}^{оп} = 4{,}92 \cdot 20{,}3 \cdot 9.81 / (0{,}44 \cdot 0{,}96) = 0{,}57 \text{ (кВт)}.$$

Сумарна потужність електроприводів насосів:

– в максимальний режим:

$$N_н^{мз} = N_{нсв}^{мз} + N_{рец}^{мз} + N_{мн}^{мз}, \quad (4.4)$$

$$N_н^{мз} = 4{,}92 + 0 + 0{,}792 = 5{,}712 \text{ (кВт)}.$$

– в середньоопалювальний режим:

$$N_{н}^{со} = N_{нсв}^{оп} + N_{рец}^{оп} + N_{мн}^{оп}, \quad (4.5)$$

$$N^{со}_{н} = 8,97 + 7,7 + 0,57 = 17,24 \text{ (кВт)}.$$

Загальна потужність власних потреб котельні:

– в середньоопалювальний режим:

$$N_{вп}^{со} = N_{тд}^{со} + N_{н}^{со}, \quad (4.6)$$

$$N_{вп}^{оп} = 3,645 + 17,24 = 20,89 \text{ (кВт)}.$$

– максимальний режим:

$$N_{вп}^{мз} = N_{тд}^{мз} + N_{н}^{мз}, \quad (4.7)$$

$$N^{мз}_{вп} = 5,712 + 5,712 = 11,424 \text{ (кВт)}.$$

З урахуванням втрат електроенергії на освітлення та інше потужності власних потреб можуть складати:

– в середньоопалювальний режим

$$N^{со}_{вп} = 1,03 \cdot 20,89 = 21,31 \text{ (кВт)};$$

– максимальний режим

$$N_{вп}^{мз} = 1,02 \cdot 11,424 = 11,625 \text{ (кВт)}.$$

4.4 Розрахунок техніко-економічних показників котельні

Тривалість роботи котельні в трьох режимах : максимально зимній $\tau_{мз} = 30$год/рік; середньо опалювальний $\tau_{со} = 4246$год/рік; річна тривалість роботи $\tau_{р} = 4276$год/рік.

Таблиця 4.3 – Розрахунок техніко-економічних показників котельні

Величина			Розмір-ність	Розрахунок
Найменування	Позначення	Формула або спосіб визначення		
1	2	3	4	5
Річна втрата робочого палива	$B_{\text{р}}$	$(\text{B}_{\text{ргаз}}^{\text{мз}} \cdot \tau_{\text{мз}} + \text{B}_{\text{ргаз}}^{\text{со}} \cdot \tau_{\text{мз}}) \cdot 3,6$	тис.м^3/рік	$(0,03899 \cdot 30 + 0,0189 \cdot \cdot 4246) \cdot 3,6 = 293,12$
Річна втрата робочого палива	$B_{\text{р}}$	$(\text{B}_{\text{ргаз}}^{\text{мз}} \cdot \tau_{\text{мз}} + \text{B}_{\text{ргаз}}^{\text{со}} \cdot \tau_{\text{мз}}) \cdot 3,6$	тис.м^3/рік	$(0,03899 \cdot 30 + 0,0189 \cdot \cdot 4246) \cdot 3,6 = 293,12$
Річна втрата умовного палива	$B_{\text{у}}^{\text{річ}}$	$\frac{B_{\text{р}}^{\text{річ}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{Q_{\text{ну}}^{\text{р}}}$	м^3/рік	$\frac{293,12 \cdot 34,842}{29,3} = = 348,56$
Річний відпуск теплоти	$Q_{\text{річ}}$	$(\text{Q}_{\text{оп}}^{\text{мз}} \cdot \tau_{\text{мз}} + \text{Q}_{\text{оп}}^{\text{со}} \cdot \tau_{\text{со}}) \cdot 3,6$	ГДж/рік	$(1,25 \cdot 30 + 0,607 \cdot \cdot 4246) \cdot 3,6 = 9413,35$
Питомі витрати робочого та умновного палива	$\text{b}_{\text{р}}$	$\frac{B_{\text{р}}^{\text{річ}}}{Q_{\text{річ}}}$	м^3/ГДж	$\frac{348,56 \cdot 10^3}{2614,8} = 133,3$
Витрати електроенергії	$N_{\text{вп}}^{\text{річ}}$	$N_{\text{вп}}^{\text{мз}} \cdot \tau_{\text{мз}} + N_{\text{вп}}^{\text{со}} \cdot \tau_{\text{мз}}$	кВт·год/рік	$21,31 \cdot 30 + 11,625 \cdot \cdot 4246 = 49999,05$
Витрати на електроенергію	$C_{\text{ел}}$	$N_{\text{вп}}^{\text{річ}} \cdot Ц_{\text{е}}$	грн/рік	$1,98 \cdot 49999,05 = = 98998,12$
Затрати на заробітну плату	$C_{\text{з.п}}$	$\text{Q}_{\text{к}} \cdot K_{\text{шт}} \cdot Ф_{\text{з.п}} \cdot k_{\text{дод}}$	грн/рік	$3 \cdot 4500 \cdot 12 \cdot 0,8 \cdot \cdot 1,33 = 17236$
Витрати на паливо	$C_{\text{п}}$	$B_{\text{річна}} \cdot Ц_{\text{пал}}$	грн/рік	$293,12 \cdot 10^3 \cdot 10,042 = = 2943511,04$
Витрати на воду	$C_{\text{в}}$	$G_{\text{річ}} \cdot C_{\text{в}}$	грн/рік	$18578,56 \cdot 7,70 = = 143054,91$
Річна витрата води	$G_{\text{річ}}$	$(\text{G}_{\text{підж}}^{\text{мз}} \cdot \tau_{\text{мз}} + G_{\text{підж}}^{\text{со}} \cdot \tau_{\text{со}}) \cdot 3600$	м^3/рік	$(0,001193 \cdot 30 + +0,001207 \cdot 4246) \cdot \cdot 3600 = 18578,56$
Витрати на амортизацію	$C_{\text{ам}}$	$k \cdot H_{\text{а}}$	млн.грн/рік	$0,9 \cdot 0,07 = 0,063$
Витрати на поточний ремонт	$C_{\text{пр}}$	$0,2 \cdot C_{\text{ам}}$	млн.грн/рік	$0,2 \cdot 0,063 = 0,0126$
Інші витрати	$C_{\text{інші}}$	$0,06 \cdot (C_{\text{п}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{в}} + +C_{\text{з.п}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{пр}})$	грн/рік	$0,06 \cdot (2943511,04 + +98998,1 + 143054,9 + 17236 + 63000 + +12600) = 196704$

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
Експлуатаційні витрати	$C_{\text{е}}$	$C_{\text{інші}} + C_{\text{п}} + C_{\text{в}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{з.п}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{пр}}$	грн/рік	$196704 + 143054,9 + 2943511,04 + 98998,12 + 17236 + 63000 + 12600 = 3475104,07$
Собівартість відпущеної теплоти	CB	$C_{\text{е}} / Q_{\text{річне}}$	грн/ГДж	$\frac{3475104,07}{9413,35} = 369$

Таблиця 4.4. – Техніко-економічні показники після модернізації

Найменування показників	Розмірність	Базові показники котельні	Варіант роботи котельні після модернізації	Відхілення	
				Абсолютне	%
Капіталовкладення	тис/рік	-	250		
Річна втрата палива	тис.м^3/рік	293,12	223,8	69,32	30,9
Витрата на паливо	грн/рік	2943511,04	2333021,3	610489,74	26
Витрата електроенергії	кВт·год/рік	49999,05	141323,104	-91324,05	-64
Витрата на електроенергію	грн/рік	98998,12	279819,75	-180821,6	-64
Витрата на воду	грн/рік	143054,91	143054,91	-	-
Річне споживання води	м^3/рік	18578,56	18578,56	-	-
Витрата на поточний ремонт	грн/рік	12600	16800	-4200	-25
Витрата на амортизацію	грн/рік	63000	84000	-21000	-25
Витрата на заробітну плату	грн/рік	17236	22982	-5746	-25
Інші витрати	грн/рік	196704	185191,2	11512,8	6,2
Загальні експлуатаційні витрати	грн/рік	3475104,07	3271711,2	203392,87	6,2
Собівартість теплової енергії	грн/ГДж	369	315	54	17,1
Економічна ефективність	грн/рік		0,05		
Термін окупності	років	-	2,7		

Таким чином, аналізуючи отримані результати розрахунків в економічній частині роботи, можна зробити висновок, що пропонована модернізація є економічно доцільною, адже при цьому відбувається економія річної витрати палива, а також зменшуються загальні експлуатаційні витрати та собівартість теплової енергії. Термін окупності капіталовкладень складає 2,7 років.

З огляду на те, що більшість подібних установок експлуатується досить довго й існуючий електропривод на даний момент морально і фізично застарів, то така заміна дуже перспективна.

ВИСНОВКИ

При розв'язані задачі модернізації приводу насосу виконано розрахунок потужності двигуна і вибраний тип самого двигуна для привода вентилятора. Проаналізовано і вибрано частотний перетворювач для даного приводу.

Обрано двигун АИР 315S2 (IM 1081). Двигун обраної потужності задовольняє роботі насосу.

Обрано перетворювач Siemens Siemens SINAMICS G120 200 кВт - 6SL3228-0BE45-6UA0.

Сформульовано і розроблено математичну модель приводу, виконано дослідження перехідних процесів приводу. Розроблено питання енергозбереження модернізованого приводу.

З розділу моделювання зроблено висновок, що зменшення навантаження на валу досліджувального електродвигуна зі 100% до 75% від номінального призводить до автоматичного зростання швидкодії електроприводу на 55% при регулюванні швидкості від 3000 об/хв до 600 об/хв.

В розділі Охорона праці та захист навколишнього середовища розглянуті основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори дільниці, а також розроблені заходи для їхнього усунення, крім цього узагальнені питання пожежної профілактики. Особливу увагу приділено питанням охорони навколишнього середовища. Підкреслено, що з метою недопущення значного забруднення атмосферного повітря продуктами згоряння, необхідно здійснювати постійний контроль за викидами забруднюючих речовин, вживати заходи і застосовувати пристрої для їх ефективного вловлювання, знешкодження та утилізації, що дозволить дотримуватися встановлених санітарних нормативів допустимого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Аналізуючи отримані результати розрахунків в економічній частині роботи, можна зробити висновок, що пропонована модернізація є економічно доцільною, адже при цьому відбувається економія річної витрати палива, а також

зменшуються загальні експлуатаційні витрати та собівартість теплової енергії. Термін окупності капіталовкладень складає 2,7 років.

З огляду на те, що більшість подібних установок експлуатується досить довго й існуючий електропривод на даний момент морально і фізично застарів, то така заміна дуже перспективна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sivolov, G. E., Karmalov, A. I., Ivanson, P. B., & Iskakhov, Yu. B. Multilevel Automated Control System for Technological Processes of Water Supply and Sewerage. *Water Supply and Sanitary Technology*, 2011, No. 9–1.

2.Methodological Guidelines for Determining Fuel, Electricity, and Water Consumption for Heat Production by Heating Boilers of Communal Heat Power Enterprises, State Unitary Enterprise "Academy of Public Utilities named after K.D. Pamfilov", 2002.Operation Manual for Pump 1D-200-90.

3.Ilyinsky, N. F., Rozhanovsky, Yu. V., & Gornov, A. O. Energy Saving in Electric Drives. 2009, p. 127.

4.Lugovoy, A. V. On the Theory of Energy Saving through Industrial Electric Drives. *Electrical Engineering*, 2017, No. 5, pp. 62–67.

5.Khashimov, A. A. Energy-Saving Systems of Automated AC Electric Drives. *Electrical Engineering*, 2005, No. 11, pp. 34–39.

6.Braslavsky, I. Ya. Opportunities for Power Supply Using Regulated Asynchronous Electric Drives. *Electrical Engineering*, 2008, No. 8, pp. 2–6.

7.Leznov, B. S., & Chebanov, V. B. Application of Regulated Electric Drives in Pump Installations for Water Supply and Sewerage Systems. *Electrical Engineering*, 2005, No. 7, pp. 9–12.

8.Otterpol, G., & Huebner, R. Technical and Economic Aspects of Using Energy-Saving Electric Drives in Pump and Fan Mechanisms (Experience from the Firm "Elpro AG", Germany). *Electrical Engineering*, 2005, No. 7, pp. 12–16.

9.Ilyin, V. K. Prerequisites for Implementing Regulated Electric Drives in Central Heating Systems. *Electrical Engineering*, 2005, No. 7, pp. 16–17.

10юVoitech, O. A., & Popovich, O. M. Selection and Adaptation of Serial Asynchronous Motors for Operation with Frequency-Regulated Sources. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Collection of Scientific Works*, 2003, No. 3(6), pp. 34–39.

11.Shevchuk, S. P. Improving the Efficiency of Dewatering Installations. Textbook. Kyiv: UMK VO, 2000, 104 p.

12.Sivolov, G. E., Karmalov, A. I., Ivanson, P. B., & Iskakhov, Yu. B. Multilevel Automated Control System for Technological Processes of Water Supply and Sewerage. *Water Supply and Sanitary Technology*, 2011, No. 9–1.

13. Pumps: Reference Guide. , 1979, 502 p.

14.Asynchronous Motors Series 4A: Handbook / A. E. Kravchik et al. 1982, 582 p.

15. Ochkov, V. F. Mathcad 14 for Students, Engineers, and Designers. 2007, 368 p.

16. Babakin, V. I., Baiburin, E. R., & Basharov, R. A. Course Design in Electric Drive Theory. Ufa: Publishing House of USTU, 1999, 154 p.

17.Automated Electric Drives of Industrial Installations, ed. by G. B. Onishchenko. RASKHN, 2001, 52 p.

18.Technological Instruction for the Operation of Pump Equipment of the Boiler Room of the National Metallurgical Academy of Ukraine. 2005

19.Petrov, D. P. Regulated Electric Drives in Pump Installations. *Power Electronics*, No. 4, 2005, pp. 231–237.

20.Shevchuk, S. P. Improving the Efficiency of Dewatering Installations. Textbook. Kyiv: UMK VO, 2000, 104 p.

21.Use of Frequency-Regulated Electric Drives in Pump Stations. *Monthly Newspaper "Drive Technology News"*. 2014, No. 2(10), Code No. 10–6.

22.Averbakh, I. A., Barats, E. I., Braslavsky, I. Ya., & Ishmatov, Z. Sh. Frequency-Regulated Asynchronous Electric Drive as an Energy-Saving Tool. *Regional Energy*, 2012, No. 2(45), pp. 34–35.

23.Shreiner, R. T. Mathematical Modeling of AC Electric Drives with Semiconductor Frequency Converters. URO RAS, 2013, 654 p.

24 Averbakh, I. A., Barats, E. I., Braslavsky, I. Ya., & Ishmatov, Z. Sh. Electric Drives and Automation of Industrial Installations as Energy-Saving Tools. 2012, 28 p.

26. A.C. Technology Anticipated to Boost Sales in Variable Speed Drivers Market

// EPE Journal, 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 7–8.

27. Електронний ресурс: https://reductortexprom.prom.ua/p890544487-elektrodvigatel-160-kvt.html

28. Кормош М.М. Комп'ютеризована система керування / М.М. Кормош // Наукові нотатки. – 2013. – №43. – с. 115 – 117.

29. Тихенкко В.Н. Електрогідравлічний стежачий привод з редуційованим спостерігачем стану / В.Н. Тихенко // Наукові нотатки. – 2011. – №62. – с. 214 – 215.

30. Fedorynenko D.Y. Quality of management system of spindle position with hydrostatical supports of adjustable type / D.Y. Fedorynenko, S.P. Sapon // Scientific notes. Interuniversity collection. –2013. – №2. – s. 69 – 75.

31. Каіров А.С. Математичне моделювання оптимальних режимів / А.С. Каіров, Л.А. Латанська // Наукові праці. – 2010. – №98. – с. 183 – 188.

32. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування. Навчальний посібник. – 2-ге вид. перероб. та доп. / В. Г. Рудницький. – Київ: Освіта України, 2013. – 287 с.

33. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен / За ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 597 с.

34. ДСН 3.36.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: Держстандарт, 1999. – 31 с.

35. ДСН 12.1.005-88 ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. − К.: Держстандарт, 1999..

36. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – К.: Держстандарт, 1999.

37. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. – К.: Держстандарт, 1999.

38. ГОСТ 12.0.003–74. – Режим доступу: file:///D:/MyDOC/USER/Downloads/12039%120.0.003-74.pdf

39. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. – К.: Мінбуд України, 2006.

40. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок – К.: Держнаглядохоронпраці, 2001.

41. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: Укр. НДІПБ, 2007.

42. ДБН В.1.1.7-2002. Захист від пожежі. Пожежна безпека об′єктів будівництва. − К.: Держбуд України, 2003.

43. НАПБ Б.03.001-2004. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. К.: МНС України, 2004.

44. ДБН В.2.5-77:2014 «Котельні». –К.: Мінрегіон України, 2014.

45. Mislyuk Ye.V., Mislyuk O.O., Stolyarenko G.S. Operational factors influence on energy preservation and environmental safety of energy production technologies. Bulletin of Cherkasy State Technological University, 2018; 4: 81–86.