

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

**«Підвищення енергоощадності асинхронних
електроприводів основного технологічного обладнання
олійноекстракційного виробництва»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕЕ-22М*

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»,

_____Ігор ВОЛЮВАЧ

« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

Петро ПЛЕСКОВ

« 09 » 10 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Волювачу Іллі Володимировичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Підвищення енергоощадності асинхронних електроприводів
основного технологічного обладнання олійноекстракційного виробництва

Increasing the energy efficiency of asynchronous electric drives of the main
technological equipment of oil extraction production

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 15.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: аналіз основного технологічного
обладнання олійноекстракційного виробництва та шляхів підвищення його
енергоефективності; вибір та розрахунок систем регульованого асинхронного
електропривода; моделювання частотнорегульованого асинхронного
електроприводу вентиляторної установки; оцінка ефективності використання
частотнорегульованих асинхронних електроприводів в олійноекстракційному
виробництві; охорона праці; висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. І.В. Савеленко		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2023 р.	
2	Аналіз основного технологічного обладнання олійноекстракційного виробництва та шляхів підвищення його енергоефективності	13.10.2023 р.	
3	Вибір та розрахунок систем регульованого асинхронного електроприводу для основного технологічного обладнання ОЕВ	25.10.2023 р.	
4	Моделювання частотнорегульованого АЕП вентиляторної установки	30.10.2023 р.	
5	Оцінка ефективності використання регульованих асинхронних електроприводів на ОЕВ	15.11.2023 р.	
6	Охорона праці	30.11.2023 р.	
7	Висновки, перелік посилань	07.12.2023 р.	
8	Оформлення презентації МР	11.12.2023 р.	
9	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки МР	15.12.2023 р.	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис керівника

Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Ілля ВОЛЮВАЧ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 100 с.; 47 рис.; 17 табл.; 33 джерела

Волювач І. В. Підвищення енергоощадності асинхронних електроприводів основного технологічного обладнання олійноекстракційного виробництва. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом досліджень є споживання електричної енергії асинхронними електроприводами ОЕВ.

Предмет досліджень – ефективність систем частотнорегульованого електроприводу технологічного обладнання ОЕВ.

Метою роботи є підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів вентиляторів, насосів та конвеєрів.

У першій главі кваліфікаційної роботи проаналізовано склад технологічного обладнання ОЕВ, виявлені групи найбільш енергоємних споживачів та досліджені напрямки підвищенні енергоощадності АД. В другій главі проведено вибір та розрахунок конкретних заходів, щодо зменшення втрат електроенергії в АЕП, на прикладі конвеєрів, насосів та вентиляторів. Третя глава розкриває моделювання керуванням рівня тиску вентиляторної установки, що здійснено у програмі Matlab, додатку Simulink. В двох останніх главах кваліфікаційної роботи оцінюється економічний ефект від використання систем частотнорегульованого АЕП та розглядаються заходи з охорони праці.

Розроблена система заходів по впровадженню ЧРЕ забезпечує підвищення енергоощадності АЕП, надійності роботи, запобігає негативному впливу на технологічне обладнання.

Ключові слова: асинхронний електропривод, частотне регулювання, комп'ютерна модель, вентиляторна установка, підвищення ефективності

ABSTRACT

Qualification work: 100 p.; 47 Fig.; 17 tables; 33 sources

Voliuvach I. V. Increasing the energy efficiency of asynchronous electric drives of the main technological equipment of oil extraction production. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of research is the consumption of electrical energy by asynchronous electric drives of OEP.

The subject of research - efficiency of systems of frequency-regulated electric drive of technological equipment OEP.

The aim of the work is to increase the energy efficiency of asynchronous electric drives of fans, pumps and conveyors.

In the first chapter of the qualification work, the composition of the OEP technological equipment was analyzed, the groups of the most energy-intensive consumers were identified, and directions for increasing the energy efficiency of AM were investigated. In the second chapter, the selection and calculation of specific measures to reduce electricity losses in AED, using the example of conveyors, pumps and fans, is carried out. The third chapter reveals the modeling of the control of the pressure level of the fan installation, which is carried out in the Matlab program, the Simulink application. In the last two chapters of the qualification work, the economic effect of the use of frequency-regulated AED systems is evaluated and labor protection measures are considered.

The developed system of measures for the implementation of FRE ensures an increase in the energy efficiency of AED, the reliability of operation, and prevents a negative impact on technological equipment.

Key words: asynchronous electric drive, frequency regulation, computer model, fan installation, efficiency improvement

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ОЛІЙНОЕКСТРАКЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	11
1.1 Технологічний процес виробництва олії та характеристика електроприводів основного технологічного обладнання.....	11
1.2 Характеристика споживачів електроенергії олійно- екстракційного виробництва.....	14
1.3 Аналіз та побудова балансів споживання електроенергії для ОЕВ.....	16
1.4 Напрямки підвищення ефективності роботи асинхронного електропривода.....	22
1.5 Використання регульованого АЕП для підвищення енергоощадності основного технологічного обладнання ОЕВ.....	26
1.5.1. Системи з тиристорними перетворювачами напруги.....	26
1.5.2. Системи з напівпровідниковими перетворювачами частоти.	30
2. ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМ РЕГУЛЬОВАНОГО АЕП ДЛЯ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ОЕВ....	34
2.1 Застосування ППП для енергоощадного пуску асинхронних електроприводів.....	34
2.2 Впровадження регульованого асинхронного електроприводу для насосів.....	42
2.3 Впровадження регульованого асинхронного електроприводу для вентиляторів.....	49
3. МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНОГО АЕП ВЕНТИЛЯТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	56

3.1 Узагальнена структурна схема САК рівнем тиску вентиляторної установки.....	56
3.2. Комп'ютерна імітаційна модель вентиляторної установки.....	58
3.3 Комп'ютерна імітаційна модель частотнорегульованого АЕП...	62
3.4 Синтез системи автоматичного регулювання тиску вентиляторної установки.....	65
3.5 Узагальнені комп'ютерні імітаційні моделі ЧР електроприводу вентиляторної установки.....	69
3.6 Комп'ютерне імітаційне моделювання режимів роботи ЧР електроприводу вентиляторної установки.....	70
4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧР АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ОЕВ.....	75
4.1 Оцінка економічної ефективності впровадження ПЧ.....	75
4.2 Економічна ефективності впровадження ЧР електроприводу насосних установок.....	76
4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження ЧР асинхронного електроприводу ВУ.....	83
5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	85
5.1 Організація проведення ремонтних робіт в електроустановках..	85
5.2 Технічні заходи з організації безпечної експлуатації електроустановок.....	86
5.3 Розрахунок заземлення.....	93
ВИСНОВКИ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

ЕП - електропривод

ПЧ – перетворювач частоти

ККД – коефіцієнт корисної дії

САК – система автоматичного керування

ТПН – тиристорний перетворювач напруги

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ПІ- пропорційно-інтегральний

АСК - автоматизована система керування

АКЗ - асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором

АДФР - асинхронний двигун з фазним ротором

АСКТП - автоматизована система керування технологічним процесом

АЕП - автоматизований електропривод

ЧРЕП – частотнорегульований електропривод

АІН - автономний інвертор напруги

АІС - автономний інвертор струму

ОК – об’єкт керування

ВП – виконавчий пристрій

ЗІ – задавач інтенсивності

ППП – пристрій плавного пуску

ОЕВ – олійноекстракційне виробництво

ПЦ – підготовчий цех

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення енергоефективності промислового виробництва являється головним напрямком енергетичної політики. Комплексне заощадження електричної енергії пов'язане з втіленням заходів організаційного, практичного та наукового характеру.

Основу сучасного промислового виробництва становить асинхронний електропривод (АЕП). За різними даними, споживання електроенергії АЕП становить близько 60%, від загального у промисловому секторі. Важливість підвищення енергоефективності саме АЕП обумовлена як економічними, так і екологічними аспектами. Зниження споживання електроенергії підвищує конкурентноспроможність підприємства та сприяє досягненню екологічних цілей та збереженню природних ресурсів.

Вибір проведення досліджень саме в олійноекстракційній галузі теж не випадковий. Україна являється одним із провідних виробників олії у світі, займаючи майже третину світового ринку виробництва соняшника. На ринку функціонує достатньо підприємств-виробників, але близько 70% ринку приходить на долю великих компаній. Тому підвищення ефективності технологічного обладнання виробництва являється актуальним та першочерговим завданням.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи являється підвищення енергоощадності АЕП основного технологічного обладнання олійноекстракційного виробництва.

Завданням дослідження є вирішення наступних питань:

- провести аналіз основного технологічного обладнання ОЕВ, з метою виявлення найбільш енергоємних груп споживачів;
- дослідити основні напрямки підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу, які доцільно впровадити на виробництві;
- для вибраних груп споживачів (конвеєрів, транспортерів, вентиляторів, насосів) провести вибір та розрахунок регульованого електроприводу, а саме застосування пристроїв плавного пуску (ППП) та частотного регулювання швидкості обертання;

- для вентиляторної установки провести моделювання частотнорегульованого асинхронного електроприводу, яке включає розробку узагальненої структурної схеми САК рівнем тиску ВУ, комп'ютерні імітаційні моделі ВУ та частотнорегульованого АЕП, синтез системи автоматичного регулювання тиску ВУ;
- виконати оцінку ефективності використання вибраних заходів, стосовно ОЕВ;
- розглянути необхідні заходи з охорони праці.

Об'єктом дослідження являється споживання електричної енергії асинхронними двигунами технологічного обладнання ОЕВ.

Предметом дослідження являється система частотнорегульованого електроприводу асинхронних двигунів вентиляторів, конвеєрів та насосів з метою зменшення втрат електроенергії та негативного впливу на технологічне обладнання.

Методи дослідження використовують загальні принципи теорії електричних ланцюгів, обчислювальні методи, теорія автоматичного керування, сучасні інструментальні системи та методи математичного програмування та моделювання, наприклад, такі як програма MATLAB.

Теоретичні розрахунки перевіряються шляхом проведення математичного моделювання.

Науково-практична цінність роботи.

На підставі проведеного аналізу технологічного обладнання ОЕВ, обґрунтовано вибір заходів по підвищенню енергоощадності АЕП: застосування пристроїв плавного пуску двигунів та регулювання швидкості обертання.

Запропоновано імітаційну модель системи автоматичного керування рівнем тиску вентиляторної установки.

Доведено, що застосування регульованого електропривода сприяє вирішенню задач по забезпеченню оптимальних режимів роботи механізмів, підвищенню ефективності використання енергії, надійності та терміну служби устаткування.

1 АНАЛІЗ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ОЛІЙНОЕКСТРАКЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

1.1. Технологічний процес виробництва олії та характеристика електроприводів основного технологічного обладнання

Основними підрозділами олійноекстракційного виробництва (ОЕВ) являються елеватори насіння, сушарки, силосні корпуси, екстракційний цех, підготовчий цех, допоміжні підрозділи – маслобаки, насосні, котельні, автоприймні пункти, ремонтні підрозділи.

Технологічний процес виробництва олії можна представити наступним чином. На приймальній ділянці проводять лабораторний аналіз сировини, що надходить до підприємства. Визначають вологість насіння та кількість сміттєвих домішок, а також доводять сировину до якості, яка відповідає стандарту. Перевірене насіння доставляють на елеватор силосного типу, в якому воно під час зберігання постійно перемішується норіями і транспортерами, для запобігання зігрівання і порчі сировини.

Після елеватора, по галереї насіння соняшника надходить на виробництво стрічковим транспортером спочатку на звальну яму. Потім насіння розділяється на 2 паралельні лінії. Насіння гвинтовими конвеєрами подається на норії, а потім на гвинтові конвеєри через магнітний сепаратор для очищення від мінерального й органічного сміття. Сміття після сепараторів гвинтовими конвеєрами і норією транспортується в бункер сміття.

Очищене насіння гвинтовим конвеєром та норією подається на ланцюгові та скребкові транспортери. Далі насіння розподіляються на робочі рушки. Кожна робоча насіннерушка спарена з насіннєвійкою, у яку рушанка надходить самоплином.

Недоруш з перших розділів робочих насіннєвієк подається гвинтовим конвеєром на сепаратори БСХ-100 на контроль недоруша, для відділення з нього

ядра і лузги. Звільнений від лузги недоруш подається гвинтовими конвеєрами на дві насіннерушки. Лузга, яка відділилась в горизонтальних циклонах подається в гвинтові конвеєри лузги. Ядро, що відокремилося, з підсівного сита на сепараторі, надходить в гвинтовий конвеєр, розташований над бункером ядра.

Ядро з другого-п'ятого розділів насінневіск гвинтовим конвеєром подається в розподільний гвинтовий конвеєр, сюди ж надходить ядро від контрольних насінневіск недоруша і перевія, а від контрольних насінневіск лузги, далі через робочі бункери ядра на вальці.

М'ятка отримана на вальцевих верстатах ланцюговим транспортером і норією через магнітні сепаратори направляється в пресове відділення для подальшої переробки. Олійний пил позавійочних проходів усіх насінневіск направляється в гвинтовий конвеєр ядра і далі за схемою, що наведена вище.

Олійний пил від аспірації насіннерушок вентилятором осаджується в циклонах і гвинтовими конвеєрами направляється в норію, де змішується з м'яткою.

Лузга із насінневіск гвинтовими конвеєрами, норіями подається на контроль лузги на інші насінневійки, а далі гвинтовими конвеєрами на аспіраційні колонки, після чого виводиться з виробництва. Ядро, що відокремилося від лузги, із насінневіск контролю лузги надходить у конвеєр гвинтовий ядра і далі за схемою описаної вище. Аспіруємі відходи від колонки (плівка, дрібні частки ядра, олійний пил) вентиляторами направляється в циклони і далі в гвинтові конвеєра олійного пилу.

Подрібнений олійний матеріал — м'ятка — гвинтовими конвеєрами подається в розподільний скребковий конвеєр і далі в жаровні агрегату АМО-300 для волого-теплової обробки в самопропарюючихся шарах. Мезга після волого-теплової обробки в жаровнях самоплином надходить у формопреси.

Форпресова олія гвинтовим конвеєром подається у фузовловлювачі для очищення олії від механічних домішок. Фузовловлювачі з'єднані між собою переливною трубою для стабілізації рівнів.

З фузовловлювачів олія насосом подається на фільтрацію на три пластинчасті фільтри з інтервалом у часі. Мутна олія після фільтрів скидається у

фузовловлювачі, звідки подається знову на пластинчасті фільтри. Циркуляція олії здійснюється до нанесення фільтруючого шару на пластинах фільтрів і одержання чистої олії.

Відфільтрована олія після фільтрів направляється в збірну ємність і далі насосом на ваги. З ваг насосами олія відкачується в склад. Осад з фільтрувальних пластин фільтрів скидається за допомогою пневматичних вібраторів. Далі осад надходить у гвинтовий конвеєр, сюди ж надходить фуз з фузовловлювачів ланцюговою норією через магнітний захист, де змішується з м'яткою і далі конвеєром подається в жаровні агрегату АМО-300 для повторної переробки.

Жмихова ракушка з-під пресів збирається конвеєром скребковим. Крупка після дробарок конвеєром скребковим і ланцюговою норією направляється в екстракційний цех, де шляхом екстракції з неї вилучають залишки олії. Залишки від виробництва відправляють на елеватор шроту, де його гранулюють, гранульований шрот також є продуктом виробництва підприємства.

Для забезпечення нормальної роботи технологічного устаткування і як складова частина устаткування, встановлені аспіраційні системи у ряді ділянок, серед яких: аспіраційна система сепараторів, насіннерушальних машин, насінневісних машин, жаровень, сушарки-охолоджувача.

Вироблена олія закачується в маслобаки, звідки насосами подається в залізничні цистерни для відвантаження замовникам.

Лузга, після насіннерушок, використовується в якості палива на котельній, яка виробляє гарячу воду та пар на технологічні потреби. Додатковим паливом для котельні може бути мазут, для чого є відповідна насосна та склад мазуту.

Відпрацьований пар та гаряча вода охолоджуючись в градирні повертаються до котельні для повторного використання за допомогою станції конденсату.

Для забезпечення виробництва водою на підприємстві є насосна основного водопостачання, для виробництва стисненого повітря для технологічних потреб – повітряна компресорна станція.

Для проведення внутрішніх ремонтних робіт на підприємстві є допоміжні служби та цехи – автотранспортні, гаражі, склади, будівельний цех, механічний цех, кузня, електроцех.

1.2 Характеристика споживачів електроенергії олійноекстракційного виробництва

Аналіз технологічного процесу показує, що основними споживачами електроенергії на підприємстві являються електроприводи, системи стиснутого повітря, вентиляційні системи, насосні установки, освітлювальні установки.

В якості прикладу, розглянемо олійноекстракційний завод, потужність переробки якого складає 560 тис. тон соняшника на рік.

В таблиці 1.1 наведено перелік обладнання за підрозділами підприємства.

Таблиця 1.1 - Перелік підрозділів олійноекстракційного заводу.

п/п	Назва відділу	$S, \text{м}^2$	Кількість споживачів	$P_{\text{н}}, \text{кВт}$
1	Екстракційний цех	657,7	194	2342,45
2	Підготовчий цех	1576,9	111	2323,45
3	Елеватор насіння	420,4	40	391,3
4	Зерносушарка	54,7	10	136
5	Склад шроту	85,2	12	436
6	Котельня	1026,4	40	178
7	Компресорна	62,5	12	30
8	АПК	378,9	30	250
9	Градирня	158,6	9	75
10	Вагова	56,1	4	30
11	Автоприйм	108,1	4	2
12	Насосна	142,6	12	175
13	Зерносховище	7464	165	30

Найбільше електроенергії споживають підготовчий та олійно-екстракційний цеха. Розглянемо на прикладі підготовчого цеху характеристику споживачів електроенергії (табл.1.2.).

Таблиця 1.2 - Споживачі електроенергії підготовчого цеху ОЕВ.

Найменування підрозділу	№п/п	Назва споживача електричної енергії	$P_n, \text{кВт}$	$n, \text{шт}$	K_v	η	$T_p, \text{год}$
Підготовчий цех	1	Норія	4,5	2	0,3	0,86	4200
	2	Конвеєр ланцюговий	1,5	7	0,7	0,77	4200
			2,2	9	0,7	0,8	4200
			3,0	3	0,7	0,82	4200
			4,0	3	0,7	0,84	4200
			5,5	3	0,7	0,86	4200
			7,5	1	0,7	0,88	4200
	3	Конвеєр гвинтовий	1,5	2	0,7	0,77	4200
			2,2	3	0,7	0,8	4200
			4,0	3	0,7	0,84	4200
	4	Сушка насіння	46,0	1	0,7	0,92	3600
	5	Конвеєр типу «гусяча шійка»	2,2	1	0,7	0,8	4200
			4,0	2	0,7	0,84	4200
			5,5	2	0,7	0,86	4200
			7,5	1	0,7	0,88	4200
			9,2	1	0,7	0,87	4200
	6	Сепаратор лузги	3,7	5	0,4	0,84	2600
	7	Шлюзовий затвір	1,5	5	0,5	0,77	4200
			2,2	2	0,5	0,8	4200
	8	Сепаратор насіння	3,7	6	0,4	0,84	4200
			7,5	1	0,4	0,86	4200
	9	Обрушувач для насіння сої	52,75	1	0,5	0,91	1800
	10	Насіннерушка	15,75	6	0,5	0,9	2600
	11	Магнітний сепаратор	1,1	1	0,4	0,75	3600
	12	Вентилятор лузги	11,0	1	0,7	0,88	2600
			30,0	3	0,7	0,91	2600
			37,0	2	0,7	0,91	2600
	13	Від'єднувач лузги	15,75	3	0,7	0,89	2600
	14	Нагнітач лузги	18,5	1	0,4	0,89	2600
	15	Вальцевий станок	136,85	3	0,4	0,93	2600
	16	Насос конденсату	4,0	1	0,6	0,84	3600
	17	Живитель пресу	2,2	3	0,4	0,8	2600
			4,0	3	0,4	0,84	2600
	18	Прес	203,0	3	0,6	0,94	2600
	19	Гранулятор	275,40	1	0,6	0,945	1800
	20	Охолоджувач жмиху	24,6	1	0,6	0,9	3600
	21	Подрібнювач шроту	11,0	1	0,6	0,875	3600
	22	Охолоджувач шроту	33,0	1	0,6	0,91	3600
	23	Вентилятор конденсаційних парів	37,0	2	0,65	0,91	3600
	24	Фузовловлювач	3,7	1	0,4	0,84	3600
	25	Насос олії	3,0	4	0,6	0,82	3600
			7,5	2	0,6	0,875	3600
	26	Мішалка	22,0	1	0,55	0,9	3600
	27	Жаровня	57,20	3	0,6	0,92	2600

1.3 Аналіз та побудова балансів споживання електроенергії для підготовчого цеху ОЕВ

Розглянемо побудову річного балансу споживання активної електроенергії підготовчого цеху (ПЦ) розрахунково-аналітичним методом.

Електрична енергія витрачається на живлення технологічного обладнання, допоміжного обладнання, внутрішнє та зовнішнє освітлення, аварійне освітлення, тощо.

Розрахунок споживання електроенергії (W_c) кожною одиницею обладнання (або групами однотипного обладнання) виконується за спрощеними формулами:

$$W_c = P_c T_p, \quad (1.1)$$

де P_c - середня потужність струмоприймача (групи однотипних струмоприймачів) протягом відповідного періоду, кВт; T_p - тривалість роботи споживача (групи однотипних споживачів) за той же період, год.

В свою чергу середня потужність, що споживається, визначається:

$$P_c = P_v K_B n, \quad (1.2)$$

де P_v - встановлена потужність струмоприймача даного типу, кВт; K_B - коефіцієнт використання встановленої потужності; n - кількість струмоприймачів даного типу.

Наводимо числовий приклад розрахунку споживання електроенергії для однієї групи однотипних струмоприймачів (на прикладі ланцюгового конвеєра).

$$P_c = P_v K_B n; \quad (1.3)$$

$$P_c = 2,2 \cdot 0,7 \cdot 3 = 4,62 \text{ кВт};$$

$$W_c = P_c T_p; \quad (1.4)$$

$$W_c = 4,62 \cdot 4200 = 19404 \text{ кВт}.$$

Результати аналогічних розрахунків для інших груп однотипних споживачів зведені в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Розрахунок споживання електроенергії обладнанням підготовчого цеху.

№ п/п	Найменування енергоспоживаючого обладнання	Кількість одиниць обладнання, шт	Встановлена потужність одиниці обладнання, кВт	Загальна встановлена потужність обладнання, кВт	Коефіцієнт використання встановленої потужності	Середня потужність обладнання, кВт	Тривалість роботи за рік, год	Річне електро-споживання, кВт·год
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<i>Основне обладнання</i>							
1	Конвеєр ланцюговий	7	1,5	10,5	0,7	7,35	4200	30870
2	Конвеєр ланцюговий	9	2,2	19,8	0,7	13,86	4200	58212
3	Конвеєр ланцюговий	3	3	9	0,7	6,3	4200	26460
4	Конвеєр ланцюговий	3	4	12	0,7	8,4	4200	35280
5	Конвеєр ланцюговий	3	5,5	16,5	0,7	11,55	4200	48510
6	Конвеєр ланцюговий	1	7,5	7,5	0,7	5,25	4200	22050
7	Норія	2	4,5	9	0,3	2,7	4200	11340
8	Конвеєр гвинтовий	2	1,5	3	0,7	2,1	4200	8820
9	Конвеєр гвинтовий	3	2,2	6,6	0,7	4,62	4200	19404
10	Конвеєр гвинтовий	3	4	12	0,7	8,4	4200	35280
11	Сушка насіння	1	46	46	0,7	32,2	4200	135240
12	Конвеєр типу «гусак»	1	2,2	2,2	0,7	1,54	4200	6468
13	Конвеєр типу «гусак»	2	4	8	0,7	5,6	4200	23520
14	Конвеєр типу «гусак»	2	5,5	11	0,7	7,7	4200	32340
15	Конвеєр типу «гусак»	1	7,5	7,5	0,7	5,25	4200	22050
16	Конвеєр типу «гусак»	1	9,2	9,2	0,7	6,44	4200	27048
17	Магнітний сепаратор	1	1,1	1,1	0,4	0,44	4200	1848
18	Шлюзовий затвір	5	1,5	7,5	0,5	3,75	4200	15750
19	Шлюзовий затвір	2	2,2	4,4	0,5	2,2	4200	9240

Продовження таблиці 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	Сепаратор насіння	6	3,7	22,2	0,4	8,88	4200	37296
21	Сепаратор насіння	1	7,5	7,5	0,4	3	4200	12600
22	Обрушувач для насіння	1	52,75	52,75	0,5	26,38	4200	110775
23	Насіннерушка	6	15,75	94,5	0,5	47,3	4200	198450
24	Сепаратор лузги	5	3,7	18,5	0,4	7,4	4200	31080
25	Вентилятор лузги	2	30	60	0,7	42	4200	176400
26	Вентилятор лузги	2	37	74	0,7	51,8	4200	217560
27	Від'єднувач лузги	3	15,75	47,25	0,7	33,1	4200	138915
28	Нагнітач лузги	1	18,5	18,5	0,4	7,4	4200	31080
29	Вальцевий станок	3	137	411	0,4	164,2	4200	689724
30	Жаровня	3	57,2	171,6	0,6	102,9	4200	432432
31	Живитель пресу	3	2,2	6,6	0,4	2,6	4200	11088
32	Живитель пресу	3	4	12	0,4	4,8	4200	20160
33	Прес	3	203	609	0,6	365,5	4200	1534680
34	Гранулятор	1	275	275	0,6	165,2	4200	694008
35	Охолоджувач жмиху	1	24,5	24,5	0,6	14,8	4200	61992
36	Подрібнювач шроту	1	11	11	0,6	6,6	4200	27720
37	Охолоджувач шроту	1	33	33	0,6	19,8	4200	83160
38	Вентилятор конд. парів	2	37	74	0,65	48,1	4200	202020
39	Фузовловлювач	1	3,7	3,7	0,4	1,5	4200	6216
40	Насос олії	4	3	12	0,6	7,2	4200	30240
41	Насос олії	2	7,5	15	0,6	9	4200	37800

Для інших цехів розрахунок корисного споживання електроенергії виконується аналогічно і зведено в таблицю 1.4 .

Таблиця 1.4 – Річне споживання електроенергії по цехам заводу

п/п	Назва підрозділу	Річне електроспоживання, кВт·год		
		Технологічне та допоміжне обладнання	Освітлення	Всього
1	Підготовчий цех	5456346	119521,92	5575867,9
2	Екстракційний цех	6117504,7	101697,75	6219202,5
3	Зерноховище	877716,2	101,7	877817,9
4	Зерносушарка	394618	839,6	395457,6
5	Склад шроту	428786,75	2609,6	431396,4
6	Котельня	2697790,55	59595,3	2757385,9
7	Компресорна	988604	2415,3	991019,3
8	Заводоуправління	76893	19644,8	96537,8
9	Гради́рня	529092	2302,5	531394,5
10	Вагова	15236,6	814,6	16051,2
11	Автоприйм	365508	1045,1	366553,1
12	Насосна	418672,8	6207,9	424880,7
13	Елеватор насіння	5740842,03	1805,7	5742647,7
	Всього			24426212,4

Витратна частина річного балансу споживання електроенергії заводу зображена на рисунку 1.1, а підготовчого цеху – на рисунку 1.2.

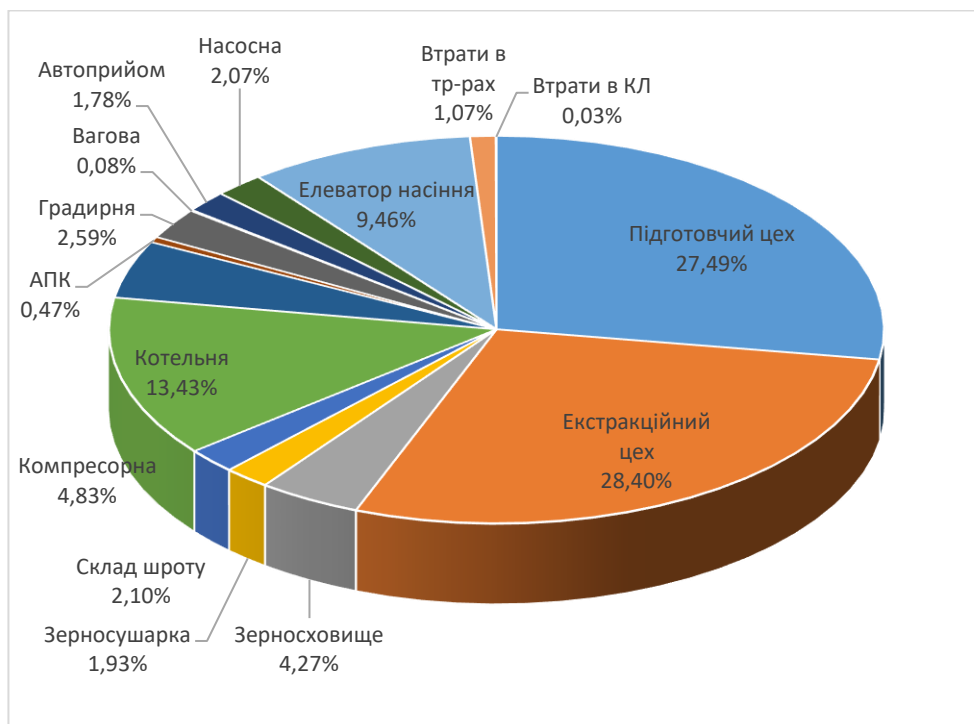


Рисунок 1.1 – Витратна частина річного балансу споживання електроенергії олійноекстракційного виробництва

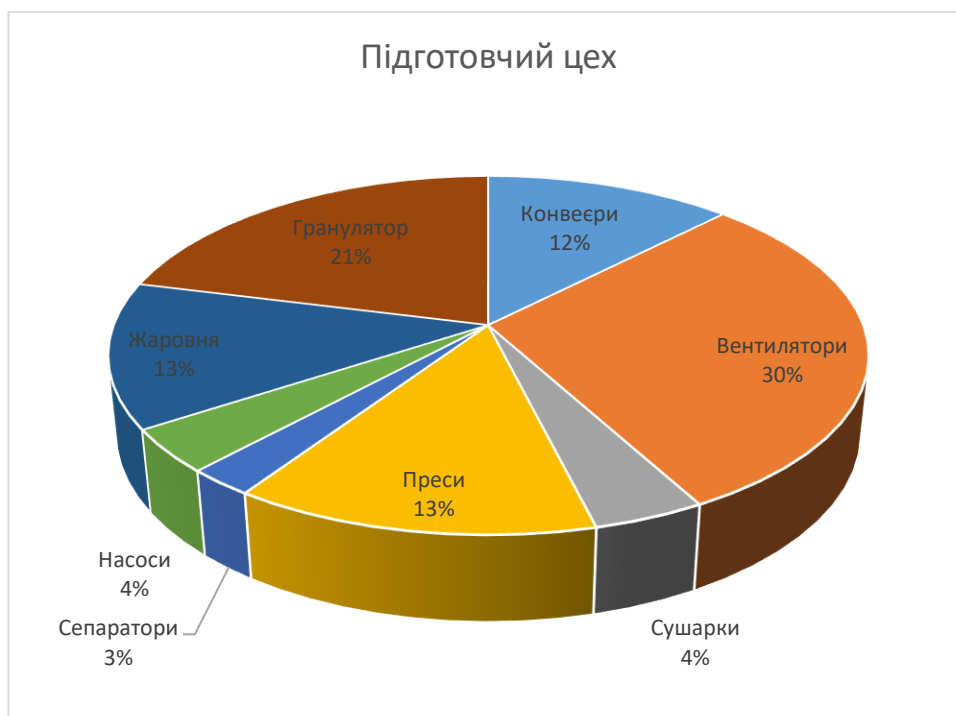


Рисунок 1.2 – Витратна частина річного балансу споживання електроенергії в підготовчому цеху

Найбільше електричної енергії споживається у підготовчому та екстракційному цехах, де найбільш енергоємним є технологічне обладнання: конвеєри, норії, насіннерушки, вентилятори, вальцеві станки, жаровні, преси, гранулятори та насоси.

Значна доля споживання електроенергії приходить на котельню та елеватор насіння. В котельній найбільш енергоємним є димососи, вентилятори дуття, живильні насоси.

Таким чином, асинхронний електропривод являється основним споживачем електроенергії на виробництві. Підвищення енергоефективності асинхронного електропривода суттєво впливає на ефективність роботи підприємства в цілому.

1.4 Напрямки підвищення ефективності роботи асинхронного електропривода

Відомі напрямки зниження споживання електроенергії [2] в асинхронних двигунах (АД). Основні з них приведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Напрямки заощадження електроенергії в асинхронних двигунах.

№	Характеристика напрямку
1	Покращення вибору електродвигунів
2	Застосування енергозберігаючих двигунів та двигунів поліпшеної конструкції
3	Вибір електроприводів без проміжних передач
4	Вплив на виконання технологічного процесу
5	Використання раціональних режимів роботи та експлуатації електроприводів
6	Розробка спеціальних схемних рішень, які зменшують шкідливий вплив на енергетичні показники у разі відхиленні навантаження від номінального.
7	Заміна нерегульованого електропривода регульованим

Перші шість напрямків стосуються найбільш розповсюдженого нерегульованого електропривода та дозволяють отримати досить добрі результати при їх впровадженні у виробництво [2].

Наприклад, підтримання номінального теплового режиму при експлуатації електродвигуна допомагає зменшити кількість аварійних відмовлень машин. Якщо враховувати недовантаження ЕМ у нормальному режимі на (20 – 25) %, що зменшує продуктивність у (2,5 – 3) рази, кошти, що витрачаються на ремонт, наближаються до вартості нового двигуна.

Певний ефект має застосування двигунів поліпшеної конструкції і енергозберігаючих двигунів, що мають підвищені значення ККД та $\cos \varphi$ (рис.1.3).

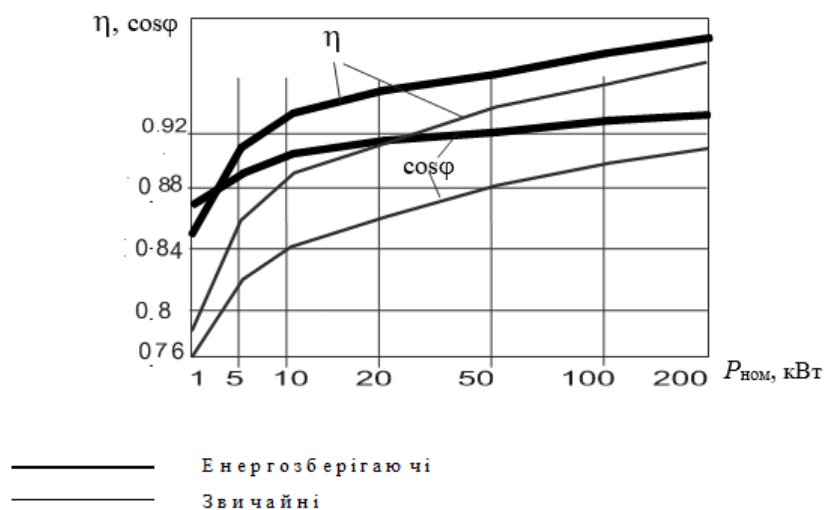


Рисунок 1.3 – Значення ККД та $\cos \varphi$ для звичайних і енергозберігаючих двигунів.

Але, доцільність застосування покращених двигунів повинна оцінюватися техніко-економічними розрахунками, оскільки підвищення ККД та $\cos \varphi$ досягається шляхом збільшення маси заліза та міді.

Втілюються у виробництво асинхронні двигуни для регульованого електропривода з поліпшеними характеристиками та коригуванням вимог до систем керування.

Усунення проміжних передач являється резервом зменшення споживання електроенергії в електроприводах. Відомо, що в механічних передачах, в

середньому, втрачається (7-10)% потужності. Тобто, поєднання двигуна та, безпосередньо, робочого органу, може підвищити коефіцієнт корисної дії системи на (2-7)% .

Наступний напрямок стосується підвищення ефективності технологічного процесу. Для економії електроенергії потрібно виконувати наступні заходи:

- зміну режимів роботи електроприводу при зміні навантаження;
- регулювання продуктивності установки;
- підвищення значення ККД установки;
- дотримання оптимальної циклограми та упорядкування графіка навантажень;
- підтримання нормованого завантаження;
- використання нових видів сучасних електроприводів;
- контролювання стану технологічної установки;
- планування організаційних заходів.

Наступний напрямок передбачає вибір раціональних режимів роботи та експлуатації електропривода. До цього напрямку відносять такі заходи:

- вибір раціонального способу та діапазону регулювання швидкості ЕП залежно від технологічних умов праці машин та механізмів;
- вибір оптимального способу регулювання швидкості залежно від характеру зміни навантаження;
- усунення режиму неробочого ходу;
- збільшення завантаження робочих машин;
- мінімізація струму та втрат енергії в асинхронному двигуні при зміні навантаження;
- зменшення напруги, що подається на затискачі електродвигуна;
- оптимізація динамічних режимів.

Також, запропоновано для нерегульованих електроприводів застосовувати спеціальні схемні рішення, які дозволять мінімізувати погіршення енергетичних показників у разі відхилення навантаження від номінального. Наприклад, регулятори напруги, до яких підключається статор асинхронного двигуна, що дозволяє також керувати режимами пуску та гальмування, здійснювати захист та діагностику привода, що збільшує його надійність.

За допомогою регулювання напруги статора асинхронного двигуна, здійснюється мінімізація струму, що споживає двигун, при недовантаженні, недовикористанні встановленої потужності, при зміні навантаження. За рахунок вибору найбільш економічного режиму мінімізуються втрати електроенергії в двигуні. Такий захід дозволяє отримати до 5% економії електроенергії, що в масштабах застосування для масового електроприводу становить значний економічний ефект.

Найбільш ефективний напрямок заощадження електроенергії полягає у переході до регульованого електроприводу, який дозволяє врахувати особливості конкретного технологічного процесу.

Реалізація цього напрямку потребує аналізу технологічного процесу, визначення умов експлуатації приводу та розробку технічних вимог. Далі потрібно визначити можливі варіанти використання електроприводів та провести їх техніко-економічне порівняння. Після визначення остаточного варіанту проводиться розробка конструкторської документації, розрахунок системи електропривода та розробка системи керування.

Такі виробничі механізми як транспортери, конвеєри, підйомно-транспортні системи, ліфти, працюють в режимі частих вмикань та потребують реалізації пускогальмівних режимів. Для них доцільно використання недорогих систем тиристорних регуляторів напруги (ТРН), які здійснюють плавний пуск (ПП) і гальмування з обмеженням значення струмів в динамічних режимах. Це дозволяє знизити споживання електроенергії на (3-6)%, що залежить від потужності двигуна. Обмеження пускових струмів також дозволяє вирішити ряд технологічних задач, які пов'язані зі зниженням прискорень та ривків, обмеженням механічних кінематичних передач, збільшенням терміну служби устаткування та надійності.

Для приводів механізмів, які потребують плавного пуску та невеликого діапазону регулювання швидкості обертання ($\sim 2\%$) доцільно застосовувати тиристорні регулятори напруги.

Для приводів механізмів, що потребують за умовами технологічного процесу значного регулювання швидкості обертання, доцільно використовувати частотнорегульований електропривод. З застосуванням регульованого

електропривода пов'язано покращення технологічних процесів та автоматизація виробництва. Регульований електропривод допомагає забезпечити оптимальні режими роботи механізмів, що веде до підвищення ефективності використання енергії, і таким чином, до зниження собівартості продукції, зростанню продуктивності праці та терміну служби устаткування.

1.5 Використання регульованого АЕП для підвищення енергоощадності основного технологічного обладнання ОЕВ

1.5.1. Системи з тиристорними перетворювачами напруги.

Силова структура тиристорного перетворювача напруги (ТПН) складається, як правило, з шести тиристорів, що вмикаються зустрічно-паралельно, попарно, між статорними колами трифазного АД та мережею. Таку схему підключення наведено на рис. 1.4.

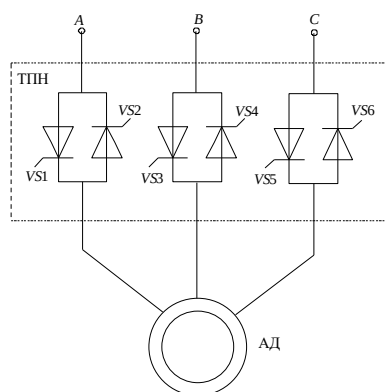


Рисунок 1.4 - Схема силовій структури системи ТПН – АД.

Перетворювач виконує регулювання основної гармоніки напруги живлення двигуна за рахунок зміни кута відкриття тиристорів α . Діапазон зміни кута α : $\varphi \leq \alpha \leq 180^\circ$. Це відповідає зміні діючої фазної напруги першої (основної) гармоніки від $U_1 = U_{1\text{ном}}$ до $U_1 = 0$. Кут φ – це кут відставання струму від напруги для синусоїдального живлення. Частота напруги першої гармоніки дорівнює частоті мережі $f_1 = f_{1\text{ном}}$, і залишається постійною. Таке керування забезпечує

регулювання моменту двигуна при постійному значенні синхронної швидкості АД та граничного ковзання.

При використанні ТРН в усталеному режимі, втрати в елементах АД можливо розрахувати за формулами:

$$\Delta P_{1m} = \Delta P_{1m.ном} \cdot k_{п1}^2 M'_c [A \cdot S_{ном} / S + (1-A) \cdot S / S_{ном}] ;$$

$$\Delta P_{2m} = \Delta P_{2m.ном} \cdot k_{п2}^2 M'_c \cdot S / S_{ном} ;$$

$$\Delta P_{1c} = \Delta P_{1c.ном} \cdot M'_c [B \cdot S_{ном} / S + (1-B) \cdot S / S_{ном}] .$$

де $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ - значення ковзання АД з КЗ ротором.

Робота АД на регулюючих характеристиках характеризується значним зменшенням $\cos \varphi$. При значенні $\omega_0 = 0,6 \cdot \omega_{ном}$ у межах зміни моменту від 0 до $M_{ном}$ АД працює в зоні переривчатих струмів.

При розрахунках ККД електропривода в системах ТПН – АД допустимо знехтувати механічними та додатковими втратами, а також втратами в сталі ротора, так як вони малі порівняно з іншими складовими втрат. Формула для розрахунку ККД наступна:

$$\eta = \frac{M_c \cdot \omega}{M_c \omega + \Delta P_{1m} + \Delta P_{2m} + \Delta P_{1c}} .$$

При використанні АД з КЗ роторами в системах ТПН відносні втрати в роторі більше відносних втрат в інших елементах машини. Встановлену потужність АД потрібно вибирати так, щоб в діапазоні регулюючих швидкостей потужність втрат у роторі була нижча за номінальну потужність втрат. Для забезпечення необхідного теплового режиму двигуна потрібно виконання умови:

$$\Delta P_{2m} \leq \Delta P_{2m.ном} .$$

Допустимий по нагріванню відносний момент двигуна повинен визначатися за формулою:

$$M'_{доп} = M_{доп} / M_{ном} \leq S_{ном} / k_{п2}^2 S . \quad (1.5)$$

Аналіз формули (1.5) показує, що тривале регулювання швидкості при $M_c = \text{const}$ для системи ТПН-АД практично неможливо. Це пов'язано з тим, що при збільшенні ковзання порівняно з номінальним набагато збільшуються втрати в статорі та в роторі двигуна. Для того, щоб асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором працював без перегріву, потрібно збільшувати потужність двигуна, порівняно з потужністю статичного навантаження.

Залежність $\eta = f(\omega)$ (рис. 1.5) показує низьку енергетичну ефективність регульованих електроприводів в системі ТПН-АД, які потребують підвищеної витрати електроенергії та мають низький ККД.

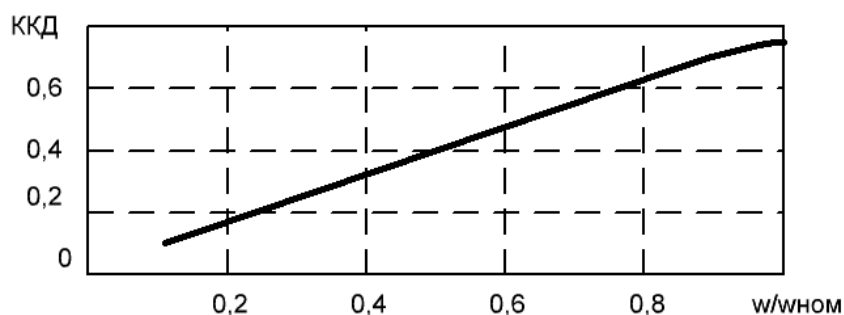


Рисунок 1.5 - Залежність $\eta = f(\omega)$ для АД з короткозамкнутим ротором при керуванні від ТРН.

Основне призначення систем ТПН-АД полягає у забезпеченні регульованого плавного пуску та гальмування асинхронних двигунів. При цьому, можуть бути використані три основні способи: керування напругою, струмом або моментом.

Найбільш простим вважається спосіб керування напругою. Його реалізація полягає у завданні початкової напруги та бажаної тривалості пуску. При цьому, не контролюються значення струму та моменту двигуна під час пуску. Такий спосіб є непридатним для важких умов пуску.

При керуванні струмом, здійснюється контроль наростання напруги, яке триває до досягнення струмом необхідного значення. Після цього підтримується значення струму і наростання напруги припиняється. До недоліку цього способу можна віднести зміну прискорення у процесі розгону.

Найбільш досконалий та складний спосіб – це управління моментом. В цьому способі реалізується замкнута система регулювання по моменту. Це дозволяє отримати лінійну залежність зміни швидкості двигуна. Цей спосіб дозволяє регулювати прискорення та гальмування електропривода навіть при зміні навантаження.

Крім основного призначення, є ряд дуже важливих функцій, які можливо отримати за рахунок мікропроцесорної системи керування. До них відносяться:

- стеження за навантаженням асинхронного двигуна. Мікропроцесорна система ідентифікує режим роботи двигуна за виміряними значеннями струму та напруги (перевантаження або недовантаження), що допомагає запобігти аваріям технологічного обладнання;
- режим роботи при зниженій швидкості АД;
- підвищення моменту АД на короткий термін, що використовується для механізмів, які мають підвищений момент торкання;
- забезпечує релейні або аналогові входи та виходи. Це дозволяє здійснювати дистанційне керування перетворювачем.

Тиристорні перетворювачі напруги дозволяють здійснювати діагностику та захист двигуна, перетворювача та технологічного процесу. Наприклад, захист від перегріву двигуна або перетворювача, недовантаження двигуна, захист від недопустимого підвищення напруги мережі та інші.

Як правило, ТПН обладнаний вбудованим дисплеєм та клавіатурою, які дозволяють виконувати широкий набір сервісних функцій. Наприклад, можливо відображати у ході експлуатації параметри системи: напругу, струм, споживану потужність двигуна, температурний стан та коефіцієнт потужності.

Сучасний ТПН можна вважати багатофункціональним пристроєм, який крім забезпечення керованих пускогальмівних режимів, дозволяє здійснювати автоматизацію технологічних процесів, забезпечує надійність та безпеку обладнання.

1.5.2. Системи з напівпровідниковими перетворювачами частоти.

Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів за допомогою зміни частоти напруги, що підводиться до обмотки статора, визначається відомою формулою:

$$\omega_0 = (2\pi \cdot f_1) / p_{\text{п}}, \quad (1.6)$$

де f_1 – значення частоти напруги обмотки статора;

$p_{\text{п}}$ – кількість пар полюсів двигуна.

Зміна частоти напруги статора дозволяє отримати відмінні швидкості ідеального неробочого ходу. Розглянемо випадок, коли при постійній напрузі статора зменшується частота. В асинхронному двигуні проходять наступні процеси: критичний та пусковий моменти двигуна підвищуються, разом із жорсткістю механічних характеристик, але суттєво зростає струм намагнічування та струм статора. Це призводить до насичення магнітної системи двигуна, і з цим пов'язано збільшення магнітних та електричних втрат. З цього можна зробити висновок, що для покращення техніко-економічних характеристик двигуна, потрібно одночасно з частотою змінювати і напругу двигуна у функції моменту навантаження та частоти:

$$U_1 = U_1(f_1, M). \quad (1.7)$$

Цей вираз пояснює закон частотного регулювання. Тобто, у перетворювачі частоти (ПЧ) потрібно мати можливість окремо змінювати частоту та амплітуду вихідної напруги.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів за допомогою частотного способу являється найбільш економічним серед інших варіантів [1].

Сучасні перетворювачі частоти, за способом виконання поділяються на декілька видів:

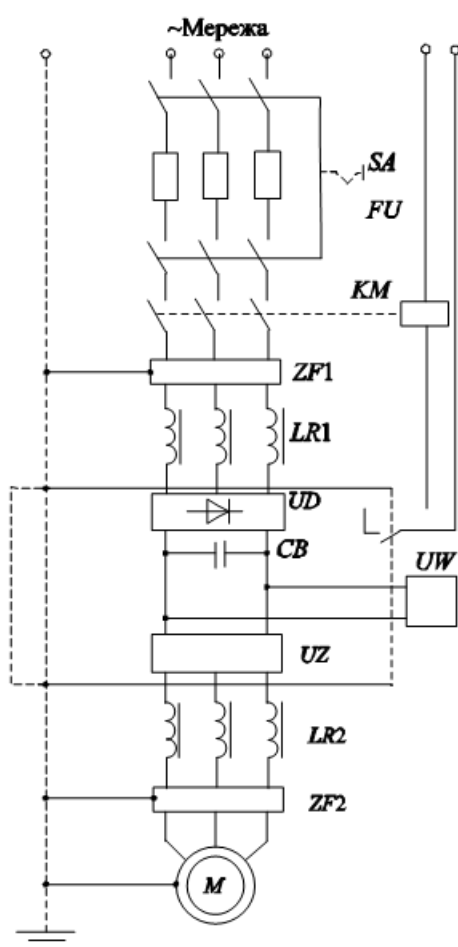
- безпосередні перетворювачі частоти;
- дволанкові ПЧ з проміжною ланкою постійного струму;

- дволанкові ПЧ з проміжною ланкою змінного струму.

У свою чергу, дволанкові ПЧ розрізняються за типом інвертора:

- автономний інвертор напруги (АІН);
- автономний інвертор струму (АІС).

Розглянемо найбільш поширений перетворювач частоти: ДПЧ з АІН, який представлено на рис.1.6.



- SA* – головний вимикач;
- FU* – лінійні запобіжники;
- KM* – головний контактор;
- ZF1* – вхідний фільтр;
- LR1* – вхідний реактор;
- UD* – випрямляч;
- CB* – фільтр ланки постійного струму;
- UW* – пристрій гальмування;
- UZ* – автономний інвертор напруги;
- LR2* – вихідний реактор;
- ZF2* – вихідний фільтр;
- M* – асинхронний двигун

□

Рисунок 1.6 - Схема силових кіл ДПЧ з АІН.

Перетворювач частоти складається з некерованого випрямляча, фільтра у ланці постійного струму та автономного інвертора напруги, який побудовано на повністю керованих напівпровідникових ключах. АІН функціонує у режимі широтно-імпульсного модулятора вихідної напруги. Крім цього, у схемі є

синусоїдальний фільтр та фільтр електромагнітної сумісності, вхідний та вихідний комутуючі реактори.

Недоліком такого перетворювача являється неможливість здійснення двостороннього обміну енергією між двигуном та мережею, через наявність некерованого випрямляча. Усунути цей недолік можливо при використанні активного випрямляча напруги.

Покращення характеристик частотних перетворювачів можливо за рахунок використання ПЧ із безпосереднім зв'язком, що використовують на повністю керованих напівпровідникових приладах.

НПЧ широко використовуються для АЕП при необхідності отримати:

- плавне регулювання швидкості АД, що необхідно за вимогами певного технологічного процесу;
- обмеження навантаження АЕП, прискорень та ривків в процесі його роботи;
- високу точність позиціонування двигуна або регулювання швидкості;
- плавне регулювання параметрів технологічного процесу;
- велику кількість вмикань протягом години;
- дистанційне керування напрямом обертання двигуна та його швидкістю.

Частотне регулювання НПЧ дозволяє отримати максимальну економію електроенергії, порівняно з нерегульованим електроприводом та іншими способами регулювання.

Системи керування НПЧ бувають скалярними та векторними. Найбільш простими та економічно доступними являються скалярні системи керування. Вони забезпечують досить високий діапазон регулювання швидкості до 1:10, але мають низьку якість регулювання та точність.

На відміну від скалярних, системи векторного керування можуть забезпечувати діапазон регулювання швидкості 1:1000, можуть виконуватися зі зворотнім зв'язком за швидкістю двигуна. Мають високу якість регулювання та швидкодію. Недоліком вважається необхідність вбудованого у двигун (або прибудованого) датчика швидкості.

Порівнюючи системи ТПН – АД та НПЧ – АД слід відзначити, що кожна з них знаходить свою область використання. Так, системи ТПН – АД застосовуються для здійснення плавних пускогальмівних режимів, коли досягається обмеження пускових моментів та струмів. Такий пуск дозволяє знизити втрати в пускогальмівних режимах та забезпечити вимоги технологічних процесів.

Забезпечення регулювання швидкості обертання для асинхронного електропривода сучасних технологічних установок має багато переваг, найбільш суттєва – заощадження електроенергії, але поряд з цим, такий підхід дозволяє покращити якість технологічного процесу. Більш детально ці переваги будуть розглянуті на прикладі конкретних технологічних установок ОЕВ у наступних главах кваліфікаційної роботи.

2 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМ РЕГУЛЬОВАНОГО АЕП ДЛЯ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ОЕВ

2.1 Застосування ППП для енергоощадного пуску асинхронних електроприводів

Прямий пуск АД являється простим та надійним, але має ряд суттєвих недоліків:

- амплітуда перехідних складових струмів в обмотках двигунів при ПП збільшується в 6-8 разів, порівняно з амплітудою струмів в усталеному режимі;
- такі струми призводять до значних зусиль в лобових частинах обмоток електродвигунів, це викликає ослаблення бандажування обмоток, порушенню ізоляції і, в гіршому випадку, короткому замиканню та пошкодженню двигуна;
- при прямому пуску спостерігається збільшення в 4-5 разів електромагнітного моменту АД, порівняно з номінальним, що веде до підвищення механічних навантажень.

Динамічний момент на початку ПП суттєво перевищує критичний момент статичної характеристики та може бути знакозмінним. Це призводить до негативного впливу на механічну частину електроприводу, зменшує термін експлуатації, надійність виробничих механізмів, провокує аварійні ситуації.

Порівняння прямого та плавного пуску асинхронних двигунів (рис.2.1), показує, що у другому випадку, зменшене значення ударного моменту не має від'ємних значень, нижче значення пускового струму.

Крім негативного впливу на сам електричний двигун, великі пускові струми негативно впливають на електричну мережу та технологічне обладнання. Проходження значних пускових струмів може привести до просадки (до 40%) напруги мережі.

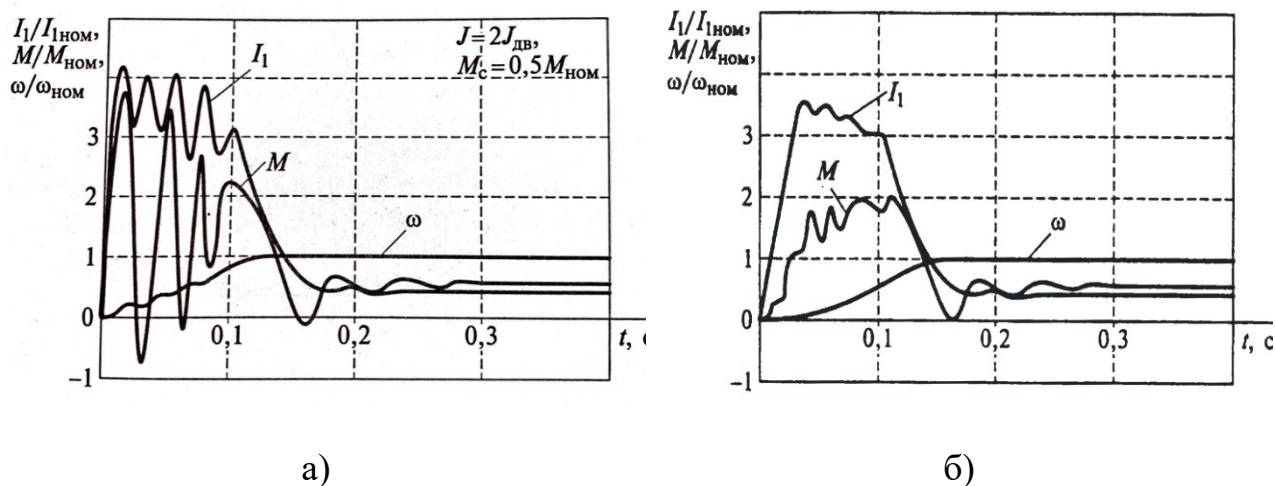


Рисунок 2.1 – Порівняння моментів, струмів та швидкості обертання при прямому а) та плавному б) пусках АД.

Якщо прямий запуск здійснюється в насосному агрегаті, виникає гідравлічний удар, що створює додаткові навантаження на фланці, труби та інші монтажні елементи конструкції, що приводить до передчасного зносу та виходу їх з ладу. Зменшення механічних та гідравлічних навантажень при плавному пуску може призвести до збільшення тривалості служби насосів і усієї системи.

При пуску конвеєрних установок плавний пуск дозволяє істотно підвищити довговічність механізмів конвеєра та конвеєрної стрічки за рахунок виключення ударних навантажень. У багатьох випадках, особливо при роботі з великими конвеєрами та підвищеними навантаженнями, використання систем плавного пуску рекомендується для оптимізації процесу та забезпечення тривалої служби обладнання.

При плавному пуску вентиляторної установки вирішується проблема з прослизанням ременів, за рахунок зменшення пускового моменту двигуна під час пуску.

В усіх випадках, застосування пристроїв ПП допомагає зменшити споживання електроенергії та знизити електричні втрати.

Реалізація плавного пуску асинхронних двигунів, як правило, здійснюється через тиристорний перетворювач напруги. Виробники електротехнічної

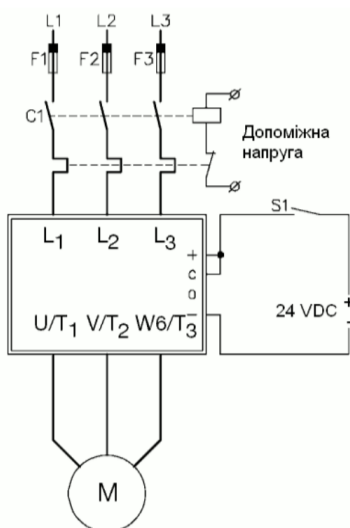
продукції пропонують достатній вибір пристроїв плавного пуску, серед яких якістю та надійністю відзначаються ППП фірми АВВ [31].

Пристрої плавного пуску «АВВ» розроблені для плавного, без ударного пуску асинхронних та синхронних електродвигунів, практично, для будь-яких сфер застосування.

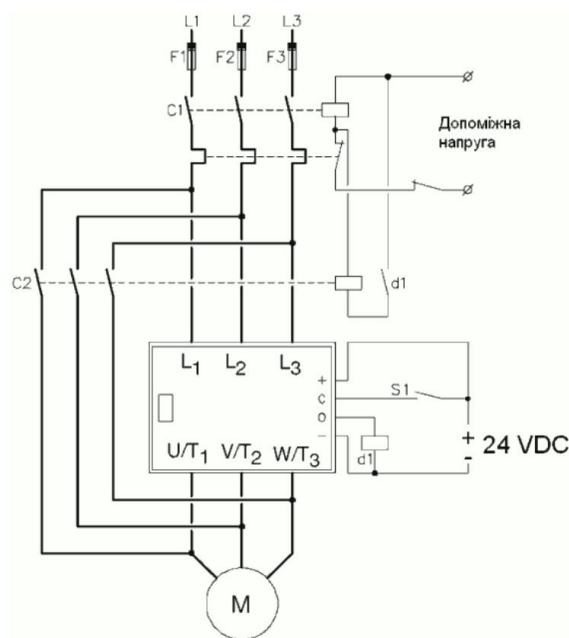
«ABB SSM» надають можливість:

- виконати плавне наростання/зниження значення напруги на протязі заданого часу для пуску/зупинки двигуна з контролем струму і моменту;
- зменшити пускові струми двигунів до потрібного значення;
- для мережа з обмеженою потужністю КЗ, зменшити провали напруги під час запуску двигунів;
- суттєво знижувати електродинамічні зусилля в обмотках двигуна і ударні механічні впливи, що здійснюються на привідні механізми.

Схеми низьковольтного пристрою плавного пуску наведено на рис.2.2.



а)



б)

Рисунок 2.2 - Схема низьковольтного пристрою плавного пуску: а) без обхідного контактора; б) з обхідним контактором.

Вибір ППП доцільно здійснювати для конкретного технологічного механізму, з врахуванням моменту навантаження. Наприклад, вентилятор, як правило, обладнаний маховим колесом, що має великий моментом інерції, через що процес пуску здійснюється під навантаженням. Рекомендується здійснювати вибір номінальної потужності пристрою ПП більше за потужність двигуна. Велике махове колесо вентилятора затягує час, що необхідний для зупинки вентилятора, тому в даній схемі не використовується функція плавної зупинки.

Відповідно до наведених рекомендацій здійснено вибір ППП для різних технологічних механізмів ПЦ (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Вибір ППП для основних технологічних механізмів.

№	Характеристика механізму	Номінальна потужність двигуна, Р _н , кВт	Тип та марка ППП	Номінальна потужність ППП, Р _н , кВт
1	Конвеєр ланцюговий	4	RSR 12	5,5
2	Конвеєр гвинтовий	5,5	RSR 16	7,5
3	Конвеєр типу «гусяча шійка»	7,5	RSR 25	11
4	Конвеєр типу «гусяча шійка»	9,2	RSR 25	11
5	Відцентровий насос	7,5	RSE 18	7,5
6	Відцентровий вентилятор	30	RSE 72	37
7	Відцентровий вентилятор	37	RSE 85	45

Загальний вигляд пристроїв плавного пуску «ABB» наведено на рис.2.3:

а) серія RSR б) серія RSE.

Оцінимо ефективність застосування пристроїв плавного пуску. Для цього порівняємо втрати при прямому та плавному пуску в АД.



PSR25–PSR30

а)



PSE18–PSE105

б)

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд пристроїв плавного пуску «ABB»:
а) серія RSR б) серія RSE.

Оцінімо, як змінюються втрати енергії в обмотках статора та ротора при плавному та прямому пусках асинхронного двигуна. Для цього розглянемо основні параметри: час наростання напруги на двигуні або час пуску, моменти опору та інерції механізму. Тривалість перехідних електромагнітних процесів залежить від коефіцієнтів загасання, що при низьких швидкостях мають мінімальні значення. Це обумовлює збільшення тривалості перехідних процесів у зоні низьких швидкостей.

Тривалий час регулювання напруги протягом перехідного процесу призводить до затягування пуску, збільшення часу, коли асинхронний двигун перебуває у зоні великих ковзань, що в свою чергу, збільшує втрати в міді ротора і статора, які пропорційно залежать від ковзання. Всі ці фактори призводять до збільшення втрат енергії при плавному пуску, порівняно з прямим.

Відношення втрат енергії при плавному пуску ($\Delta W_{\text{пл.}}$) до втрат енергії при прямому пуску ($\Delta W_{\text{пр.}}$) зображено на рис. 2.4.

Пуск двигуна вважається закінченим при першому узгодженні швидкості двигуна зі сталою швидкістю. Вважається, що за час регулювання, напруга на статорі змінюється у діапазоні ($0 - U_{\text{ном1}}$).

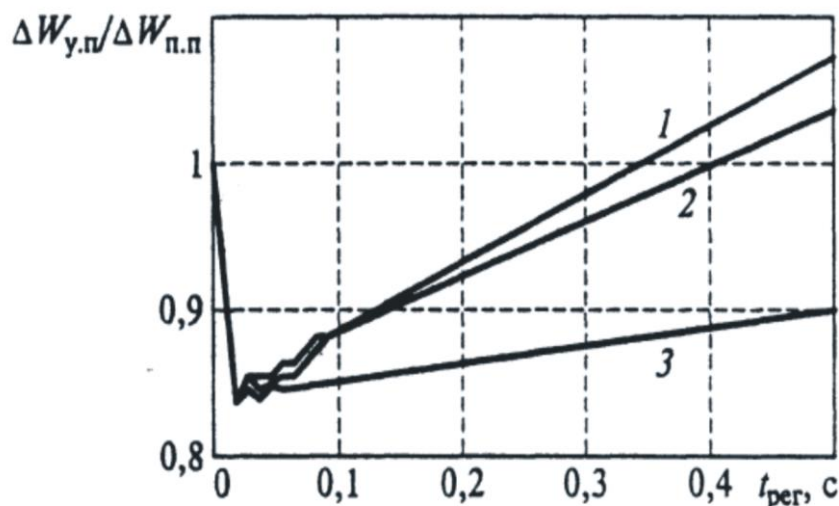


Рисунок 2.4 – Графік залежності $\Delta W_{\text{пл.}} / \Delta W_{\text{пр.}}$ від часу регулювання $t_{\text{рег.}}$.

Аналіз рисунку 2.4 дозволяє визначити зону мінімальних втрат енергії, які спостерігаються при значенні $t_{\text{рег}} = 0,02-0,04$. У цій зоні втрати енергії при плавному пуску зменшуються порівняно до втрат при прямому пуску приблизно на 15 %. Збільшення часу наростання напруги призведе до тривалішого знаходження двигуна на зниженій швидкості обертання і, як наслідок, до підвищення загальних електричних втрат. Слід відзначити, що при збільшенні моменту опору, наростання втрат відбувається швидше. Збільшення моменту інерції впливає на зменшення втрат і коливань, що зумовлені коливаннями статорного струму.

При швидкій зміні темпу наростання напруги, повна напруга подається на статор при зниженій швидкості, втрати енергії при плавному пуску практично не відрізняються від втрат енергії при прямому пуску.

Оцінимо застосування ППП для двигунів транспортерів, що використовуються у підготовчому цеху, на прикладі двигуна потужністю $P_{\text{ном1}} = 7,5$ кВт. Технічну характеристику двигуна наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики двигунів конвеєрів ПЦ

№	Марка двигуна	$P_{\text{ном,}}$ кВт	$p,$	$U_{\text{ном,}}$ В	$\eta_{\text{ном,}}$ -	$J_{\text{д,}}$ кг·м ²	$J_{\text{пр.м,}}$ кг·м ²	$R_1,$ Ом	$R_2',$ Ом
1	АІР 132 М6	7,5	3	380	0,857	0,057	1,15	0,321	0,215

Визначаємо значення синхронної кутової швидкості:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,720 \text{ рад/с.}$$

Знаходимо значення сумарного моменту інерції привода:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} + J_{\text{пр.м}} = 0,057 + 1,15 = 1,208 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де $J_{\text{д}}$ - момент інерції асинхронного двигуна;

$J_{\text{пр.м}}$ – момент інерції механізму, що приведений до валу двигуна.

Визначаємо сумарні втрати енергії в двигуні для прямого пуску:

$$\Delta W_{\text{пр.}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = \frac{1,208 \cdot 104,720^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,321}{0,215}\right) = 16,512 \text{ кВт} \cdot \text{с};$$

для реверсу:

$$\Delta W_{\text{рев.}} = 4 \cdot \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 4 \cdot \frac{1,208 \cdot 104,720^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,321}{0,215}\right) = 66,051 \text{ кВт} \cdot \text{с}.$$

Проведемо оцінку втрат енергії при плавному пуску. По рис. 2.2 визначаємо відношення втрат енергії при плавному пуску до цього ж значення при прямому: $k = \Delta W_{\text{пл.}} / \Delta W_{\text{пр.}} = 0,838$. Час наростання напруги прийнятий $t_{\text{рег}} = 0,021 \text{ с}$.

Значення зниження втрат енергії при плавному пуску:

$$\Delta W_{\text{пл.}} = (1-k) \cdot \Delta W_{\text{пр.}} = (1-0.838) \cdot 16,512 = 2,675 \text{ кВт}\cdot\text{с} = 0,793 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Економія електроенергії при $z=17$ (цикли за годину роботи) та $T=4570$ год (години роботи на рік) складе:

$$C = \Delta W_{\text{пл.}} \cdot z \cdot T \cdot C_0 = 0,793 \cdot 10^{-3} \cdot 17 \cdot 4570 \cdot 6,56 = 404,29 \text{ грн.}$$

У випадку збільшення тривалості наростання напруги (з рис.2.2 $t_{\text{рег}} = 0,12$ с), плавного та прямого пусків вирівнюються, тобто $\Delta W_{\text{пл.}} / \Delta W_{\text{пр.}} = 1$. При подальшому збільшенні часу $t_{\text{рег.}}$, втрати при плавному пуску стануть більшими за втрати при прямому.

На значення зменшення пускових втрат впливає зниження моменті опору. Для більш потужних машин економія пускових втрат суттєвіша.

Можна зробити загальний висновок, що для отримання економії електроенергії при ПП двигунів важливо дотримуватися основних вимог: підбирати оптимальну тривалість наростання напруги, враховувати моменти опору та інерції системи, застосовувати ПП переважно для двигунів великої та середньої потужності, не збільшувати необґрунтовано час тривалості наростання напруги.

- при оптимальній тривалості наростання напруги, пускові втрати можна знизити на (10-15) % у порівнянні з прямим пуском;
- оптимальна тривалість наростання напруги складає 0,02-0,04 с;
- більше заощадження можна отримати для, при меншому моменті опору;
- якщо тривалість напруги необґрунтовано збільшується, пускові втрати енергії при керованому пуску можуть перевищити втрати прямого пуску.

Отримана економія електроенергії при плавному пуску наведена для одного двигуна, враховуючи кількість АД на підприємстві, ця економія досить суттєва. Крім отриманої економії ЕЕ, ППП дозволяє уникнути проблем, що можуть виникати при прямому пуску з технологічним обладнанням, та не вирішуються за рахунок застосування інших пускових схем.

2.2 Впровадження регульованого електроприводу для насосів

Отримати більш суттєву економію електроенергії та оптимізацію технологічного процесу можна за рахунок використання регулювання швидкості обертання двигунів.

Розглянемо на прикладі насосної установки переваги регульованого електроприводу, його вибір та розрахунок.

Регулювання швидкості обертання АД насосу забезпечує:

- підтримання натиску води на необхідному рівні;
- підвищення надійності електричного та механічного устаткування, збільшення терміну його служби;
- збільшення $\cos\varphi$, ПЧ практично не споживає реактивної енергії;
- можливості програмного налаштування параметрів ЕП, діагностики та контролю роботи;
- заощадження електроенергії, яке пов'язане з відмовою від регулювання продуктивності шляхом дроселювання та перехід на енергетично ефективне керування.

Для здійснення регулювання швидкості обертання найефективнішим являється частотнорегульований асинхронний електропривод [2].

Потужність, яка споживається насосом у випадку дросельного та частотного регулювання, визначається витратою рідини Q і може бути розрахована за формулами:

- для дросельного регулювання:

$$P_{1*} = \frac{[\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c}) \cdot Q_*] \cdot (1 + a \cdot S_{ном})}{1 - S_{ном}} ; \quad (2.1)$$

- для частотного регулювання:

$$P_{*1} = [\mu_{0c} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0c}) \cdot A^2 \cdot Q_*] \cdot \left[1 + \frac{S_n \cdot (1 + a)}{(1 - S_n) \cdot A} \right] . \quad (2.2)$$

Для пояснення переваг частотного регулювання продуктивності насосних установок порівняно з дроселюванням, скористаємося рис.2.5, на якому зображено потужності, що спожиті насосом при дроселюванні та частотному

регулюванні та нанесена крива економії електроенергії. З рисунку видно, що максимальна економія електроенергії досягається, коли рівень споживання води набагато менше номінального і дорівнює нулю при номінальній продуктивності насосу.

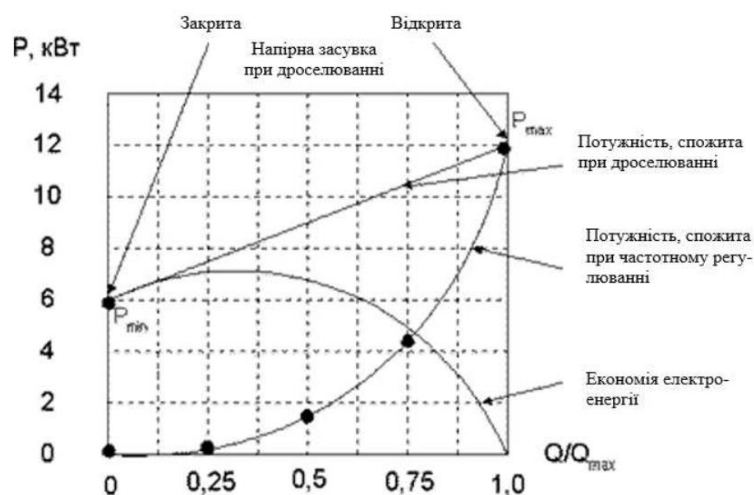
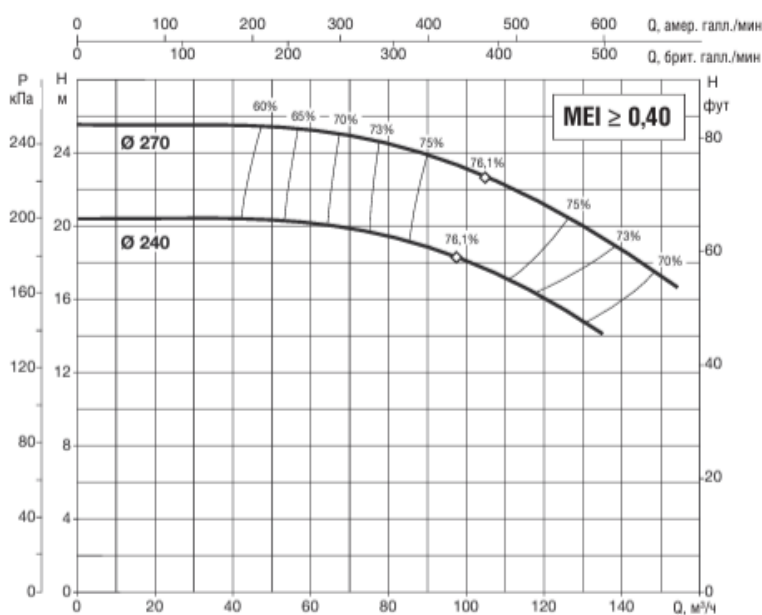


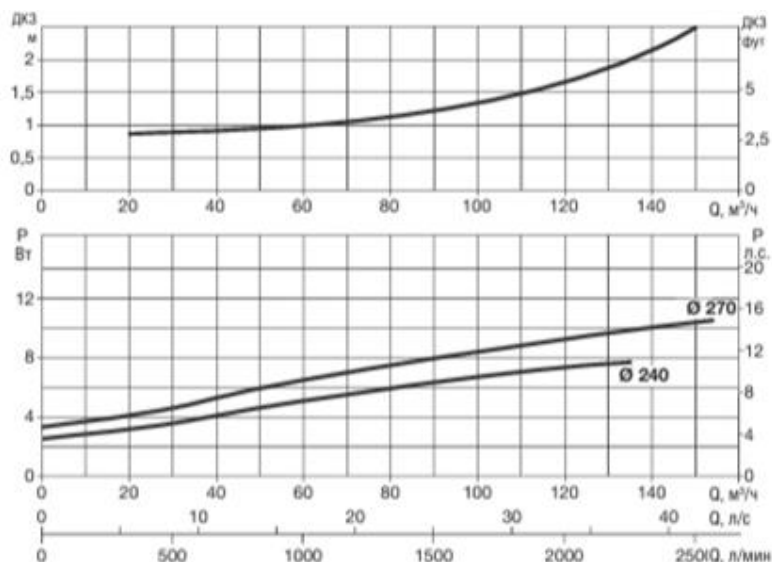
Рисунок 2.5 – Порівняння частотнорегульованого та дросельного способів регулювання продуктивності насосу.

В ПЦ встановлено відцентровий моноблочний насос марки НКМ-G 80-250/270/11/4 [33], потужність електродвигуна 11,0 кВт.

Каталожні характеристики насосу наведено на рис. 2.6 а) та б).



а)



б)

Рисунок 2.6 - Каталожні характеристики насосу NKM-G 80-250/270/11/4.

Для оцінки економії електроенергії потрібно знати зміну продуктивності насосу протягом доби. При роботі підприємства у дві зміни, графік зміни продуктивності насосу наведено на рис. 2.7.

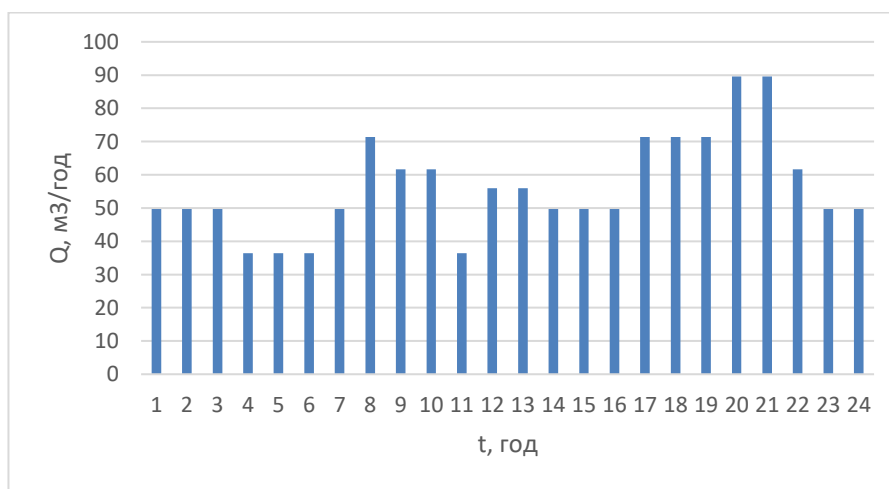


Рисунок 2.7 – Зміна продуктивності насосу протягом доби.

Характеристику насоса, яка представляє собою функцію напору від витрати рідини $H = f(Q)$, можливо записати у вигляді рівняння [1] :

$$H = H_{\phi} \cdot (n/n_{ном})^2 - C \cdot Q^2 \quad (2.3)$$

де H_{ϕ} – значення напору насоса для $Q = 0$ та $n = n_{ном}$, м;

$n_{ном}$ – значення номінальної швидкості ЕП;

C – конструктивний коефіцієнт ;

$Q_{ном}$ і $H_{ном}$ - значення номінальних витрат та напору, м³/год та м, відповідно.

Характеристика магістралі визначається наступним виразом:

$$H_c = H_n + S \cdot Q^2; \quad (2.4)$$

де H_n – статичний напір або протитиск, який відповідає $Q=0$, тобто закритій засувці;

R – коефіцієнт опору магістралі.

Визначаємо частоту обертання двигуна насосу при зміні споживання води. Будуємо нові характеристики насосу при зміні швидкості обертання двигуна насосу:

$$\omega_1 = \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_1 + C \cdot Q^2}{H_{он}}}. \quad (2.5)$$

Розрахунки зведені до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Результати розрахунку характеристик насосу при зміні швидкості обертання двигуна насосу.

Q, м ³ /год	H1 ,м	H2 ,м	H3 ,м	H4 ,м	H5 ,м	H6 ,м	H7 ,м
0	23,75	22,98	22,45	21,31	20,73	20,15	19,16
20	23,58	22,81	22,27	21,14	20,56	19,98	18,98
40	23,07	22,30	21,76	20,63	20,05	19,47	18,47
60	22,21	21,45	20,91	19,77	19,20	18,62	17,62
80	21,01	20,25	19,71	18,57	18,00	17,42	16,42
100	19,48	18,71	18,17	17,04	16,46	15,88	14,88
110	18,58	17,81	17,28	16,14	15,56	14,98	13,99
120	17,60	16,83	16,29	15,16	14,58	14,00	13,00
130	16,53	15,76	15,22	14,09	13,51	12,93	11,93

Зміну характеристик насосу при регулюванні швидкості обертання двигуна показано на рис. 2.8.

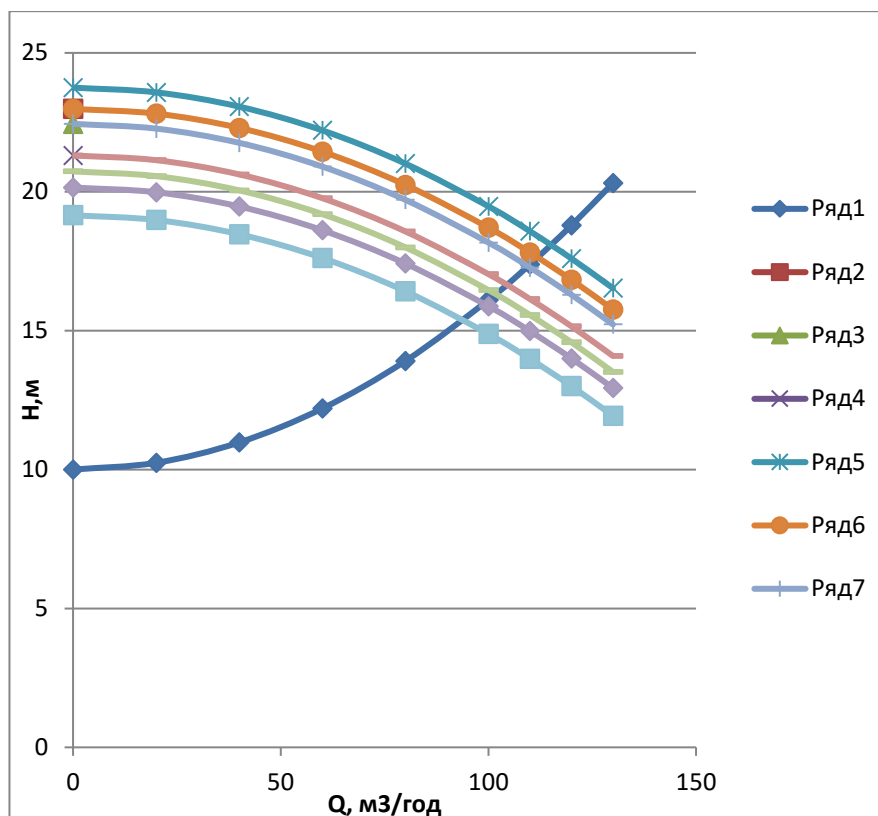


Рисунок 2.8 - Зміну характеристик насосу при регулюванні швидкості обертання двигуна.

Визначимо зменшення споживання електроенергії при частотному регулюванні порівняно з дросельним. На рис 2.9 [1] представлені дані про спожиту електроприводом відцентрового насоса потужність при дросельному та частотному регулюванні в залежності від витрат рідини та статичного напору у відносних одиницях. Графік побудований для $h_c = 0.4$.

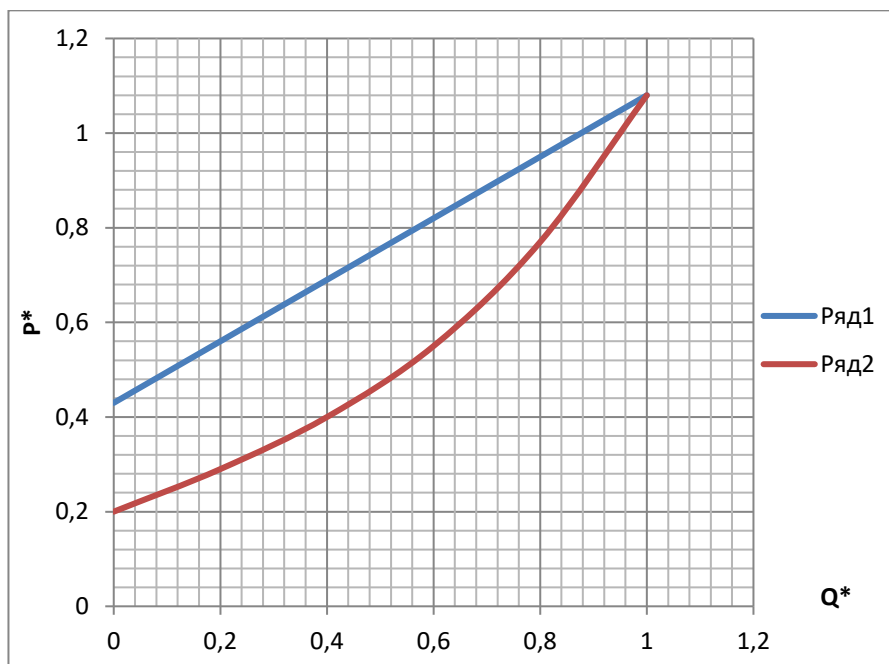


Рисунок 2.9 - Залежності $P_* = f(Q_*)$ при дросельному (крива 1) та при частотному (крива 2) регулюванні.

За графіком водоспоживання витрата води у період часу з 0 годин до 1 год складає $50 \text{ м}^3/\text{год}$, що у відносних одиницях: $50/90=0,55$. Різницю між спожитою потужністю при дросельному та частотному регулюванні (див. рис.2.9) складає $0,88-0,57=0,31$.

Потужність, що споживається двигуном насоса:

$$P_1 = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_1} = \frac{11,0}{0,72} = 15,27 \text{ кВт.}$$

де $P_{\text{мех}}$ - потужність на валу двигуна насоса;

η_1 - ККД двигуна.

Економія потужності складає $0,31 \cdot 15,27 = 4,73 \text{ кВт}$. Аналогічно виконуємо розрахунки для інших сходинок графіку водоспоживання і зводимо до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Розрахункова економія енергії, що споживається насосним агрегатом при різних способах регулювання роботи.

Час	Q, м3/год	Q/Qном	P/Pном (дрос)	P/Pном (част)	ΔP	ΔP , кВт	ΔE , грн
0-1	50	0,55	0,88	0,57	0,31	4,73	31,05
1-2	50	0,55	0,88	0,57	0,31	4,73	31,05
2-3	50	0,55	0,79	0,42	0,37	5,65	37,06
3-4	36	0,41	0,69	0,23	0,46	7,02	46,08
4-5	36	0,41	0,69	0,23	0,46	7,02	46,08
5-6	36	0,41	0,69	0,23	0,46	7,02	46,08
6-7	50	0,55	0,79	0,42	0,37	5,65	37,06
7-8	71	0,80	0,95	0,7	0,25	3,82	25,04
8-9	62	0,69	0,88	0,57	0,31	4,73	31,05
9-10	62	0,69	0,88	0,57	0,31	4,73	31,05
10-11	36	0,41	0,69	0,23	0,46	7,02	46,08
11-12	56	0,63	0,83	0,49	0,34	5,19	34,06
12-13	56	0,63	0,83	0,49	0,34	5,19	34,06
13-14	50	0,55	0,79	0,42	0,37	5,65	37,06
14-15	50	0,55	0,79	0,42	0,37	5,65	37,06
15-16	50	0,55	0,79	0,42	0,37	5,65	37,06
16-17	71	0,80	0,95	0,7	0,25	3,82	25,04
17-18	71	0,80	0,95	0,7	0,25	3,82	25,04
18-19	71	0,80	0,95	0,7	0,25	3,82	25,04
19-20	90	1,00	1	1	0	0,00	0,00
20-21	90	1,00	1	1	0	0,00	0,00
21-22	62	0,69	0,98	0,77	0,21	3,21	21,04
22-23	50	0,55	0,98	0,77	0,21	3,21	21,04
23-24	50	0,55	0,99	0,8	0,19	2,90	19,03
						110,2494	723,24

Приймаємо, що зміна потужності протягом 1 години невелика, тоді за табл.2.4., отримаємо зменшення добового споживання електроенергії 110,25 кВт·год. Вартість електроенергії приймаємо 6,56 грн/кВт·год. Якщо знехтувати зменшенням витрат води у вихідні дні, та сезонними змінами, річна економія електроенергії: 293,98 тис.грн.

Вибираємо перетворювач частоти ACQ580-01-026A-4+B056 [31] фірми АВВ, що спеціально призначений для систем водопостачання.

Схему підключення електроприводу насосу до мережі через перетворювач частоти показано на рис.2.10.

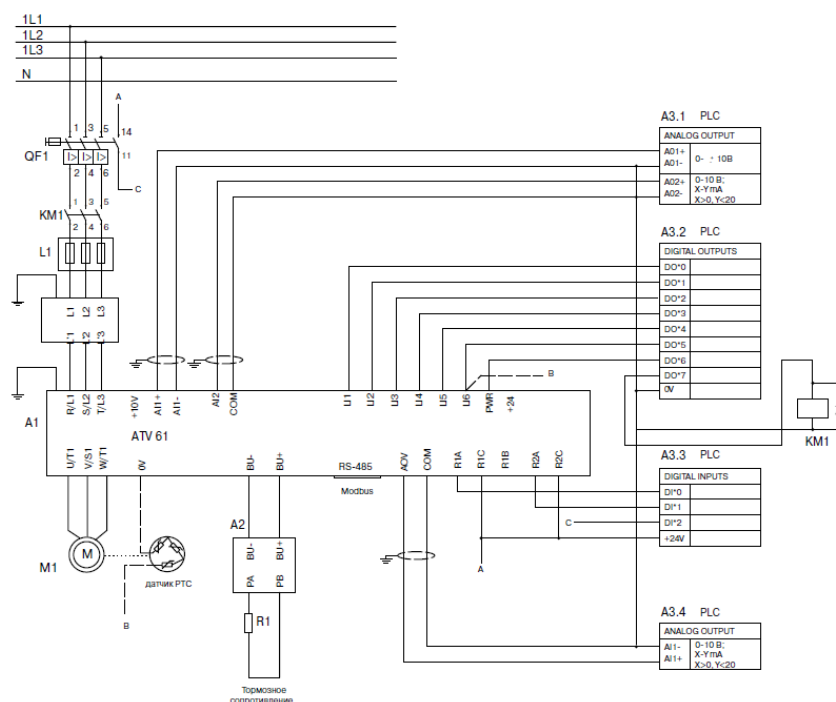


Рисунок 2.10 - Схема підключення електроприводу насоса.

2.3 Впровадження регульованого асинхронного електроприводу для вентиляторів

Вентилятори є механізмами з режимом тривалого навантаження з великим числом годин роботи на рік: навантаження на валу приводного двигуна спокійне, перевантажень у сталому режимі не виникає. Частота обертання робочого колеса вентилятора для великих машин не перевищує 730 об/хв. Вентилятори є механізмами, що володіють великим моментом інерції, що необхідно враховувати при розрахунку пускових характеристик електроприводів.

Для вентиляторних установок регулювання швидкості обертання дозволяє отримати наступні переваги, які пов'язані з енергозбереженням, контролем температури, зменшенням шуму, продовженням терміну служби.

Здатність змінювати швидкість обертання вентилятора дозволяє ефективно використовувати енергію. У випадку, коли потрібна менша кількість повітря або охолодження, можна зменшити швидкість обертання, щоб зменшити споживання електроенергії. Регулювання швидкості вентилятора дозволяє

точніше контролювати температуру в приміщенні або на пристрої. Збільшення швидкості вентилятора сприяє ефективнішому охолодженню, тоді як зменшення швидкості допомагає підтримувати стабільну температуру, коли велика потужність не є необхідною. Зниження швидкості обертання вентилятора може зменшити рівень шуму, пов'язаного з його роботою. Зменшення напруги та тиску на вентилятор може сприяти подовженню терміну його служби. Регулювання швидкості може допомогти уникнути перевантаження та зменшити знос вентилятора. Таким чином, регулювання швидкості обертання вентиляторів дозволяє підвищити енергоефективність та тривале функціонування обладнання.

Особливе значення для ряду вентиляторів має застосування регульованого електропривода. ККД вентиляторів при регульованому електроприводі повинний бути більше, ніж при нерегульованому у середньому на 15 - 20%.

За виконанням вентилятори поділяються на відцентрові на осьові. В роботі розглядається відцентровий вентилятор, характеристики якого аналогічні характеристикам відцентрових насосів.

Регулювання подачі вентиляторів може бути виконано наступними способами:

- напрямними апаратами;
- дроселюванням на вході та виході вентиляторів;
- зміною частоти обертання двигуна вентилятора.

Регулювання поворотом лопатей напрямного апарату (НА) відноситься до аеродинамічних способів і. в цьому випадку, зменшується поперечний переріз вхідного каналу, що приводить до закручування потоку на вході до робочого колеса. На рис.2.11 показано аеродинамічну характеристику вентилятора (тип ДН-12,5-1, $n_{\text{ном}} = 1000$ об/хв). Регулювання здійснюється кутом $\theta_{\text{НА}}$ повороту лопатей НА. При такому регулюванні ККД вентилятора суттєво зменшується. Такий спосіб на практиці складно реалізується, має низьку надійність та використовують рідко.

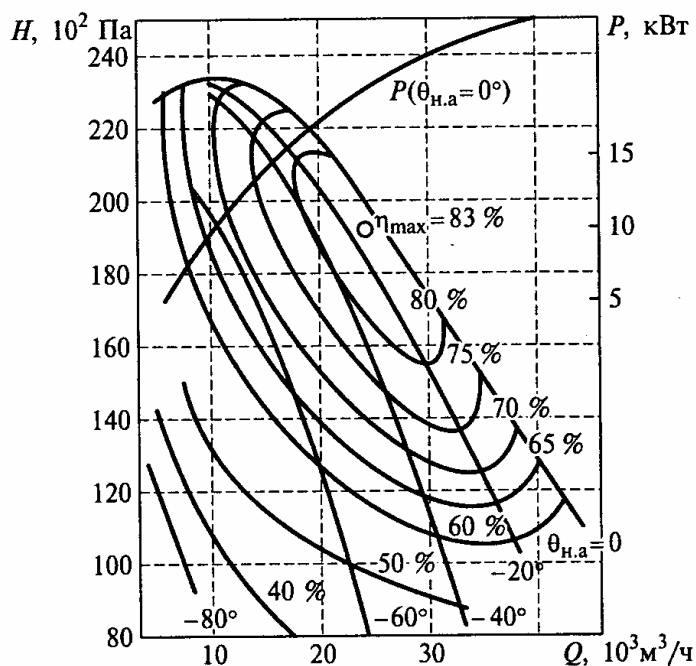


Рисунок 2.11 - Аеродинамічну характеристику вентилятора (тип ДН-12,5-1) при регулюванні НА.

При регулюванні продуктивності вентилятора шибером, відбувається зміна перерізу для вихідного каналу вентилятора, що впливає на зміну характеристика магістралі. Цей спосіб має ще нижчу ефективність, ніж перший.

Регулювання швидкості обертання валу вентилятори являється більш економічним способом, але вимагає додаткових витрат. Споживана двигуном вентилятора потужність (без врахування ККД вентилятора) при регулюванні шибером та частотному, можна визначити за формулами [1]:

- для шиберного регулювання:

$$P_{1*} = \frac{1+a \cdot S_{НОМ}}{1-S_{НОМ}} \cdot Q_*; \quad (2.6)$$

- для частотного регулювання:

$$P_{1*} = Q_*^3 + \frac{(1+a) \cdot S_{НОМ}}{1-S_{НОМ}} \cdot Q_*^2. \quad (2.7)$$

Розрахунок характеристик регульованого привода зроблений за наступними співвідношеннями:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} - \text{співвідношення витрати й швидкості};$$

$$\frac{P_{v2}}{P_{v1}} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \text{співвідношення тиску (напору) і швидкості};$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 - \text{співвідношення потужності й швидкості}.$$

На рисунку 2.12 побудовані залежності, що відповідають формулам (2.6) та (2.7). Пунктирною лінією позначені графіки з врахуванням ККД двигуна. Порівняння графіків показує зменшення споживання електроенергії практично у всьому діапазоні значень витрат Q , крім точки номінального режиму.

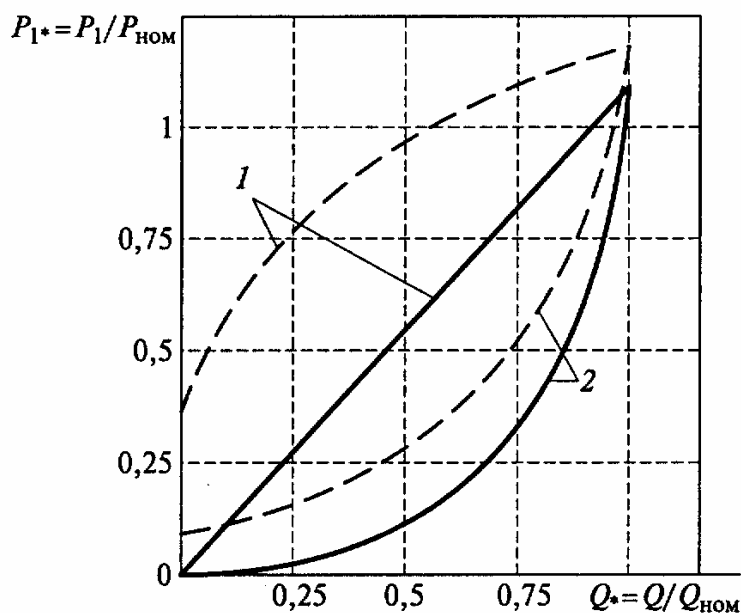


Рисунок 2.12 – Потужність, споживана вентиляторною установкою: а) при шибєрному регулюванні; б) при частотному регулюванні.

Для оцінки економії електроенергії при застосуванні частотного регулювання розглянемо відцентровий вентилятор з асинхронним двигуном ПЦ 4-76 №16 75 кВт, (виконання 5), продуктивність 110-130,4 тис.м³/год.

Розрахункові дані споживаної потужності вентилятора при різних способах регулювання надані в таблицях 2.5 – 2.7.

Таблиця 2.5 - Розрахункові дані споживаної потужності ВУ при $n = \text{const} = 985$ об/хв, регулювання витрати повітря НА при положенні лопатей 0° .

Найменування	Позна-чення	1	2	3	4	5	6	7
Витрата, тис м³/рік	Q	0,1	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Напір, кгс/м²	P _t	400,0	455,0	490,0	500,0	470,0	385,0	270,0
Швидкість двигуна, об/хв	n ₁	985,0	985,0	985,0	985,0	985,0	985,0	985,0
ККД вентилятора	η _в	0,42	0,65	0,75	0,81	0,81	0,75	0,62
ККД двигуна	η _д	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93
ККД перетворювача	η _{пер}	-	-	-	-	-	-	-
Споживана потужність, кВт	P ₁	0,3	55,7	102,7	144,0	178,4	195,2	196,6
Економія електро-енергії, кВт·год		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблиця 2.6 - Розрахункові дані споживаної потужності ВУ при $n = \text{const} = 985$ об/хв, регулювання витрати повітря НА, при положенні лопатей 50° .

Найменування	Позна-чення	1	2	3	4	5	6	7
Витрата, тис м³/рік	Q	0,1	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Напір, кгс/м²	P _t	400,0	405,0	375,0	295,0	110,0	-	-
Швидкість двигуна, об/хв	n ₂	985,0	985,0	985,0	985,0	985,0	985,0	985,0
ККД вентилятора	η _в	0,42	0,58	0,60	0,50	0,20		
ККД двигуна	η _д	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93
ККД перетворювача	η _{пер}	-	-	-	-	-	-	-
Споживана потужність, кВт	P ₂	0,3	55,5	98,3	147,6	169,1	-	-
Економія електро-енергії, кВт·год	P ₁ -P ₂	0,0	0,1	4,5	6,4	9,3	-	-

Таблиця 2.7 - Розрахункові дані споживаної потужності ВУ при $n = var$, регулювання витрати повітря зміною швидкості електродвигуна

Найменування	Позначення	1	2	3	4	5	6	7
Витрата, тис м ³ /рік	Q	0,1	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Напір, кгс/м ²	P _t	60,0	95,0	140,0	170,0	200,0	240	270,0
Швидкість дв,об/хв	n ₂	275,8	404,8	490,1	576,6	645,1	785,6	987,1
ККД вентилятора	η _в	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,75	0,63
ККД двигуна	η _д	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93
ККД перетворювача	η _{пер}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Споживана потужність, кВт	P ₂	0,02	9,40	25,43	49,34	76,54	124,16	197,40
Економія електроенергії, кВт·год	P ₁ -P ₂	0,3	46,3	77,3	94,6	101,9	71,0	-0,8

Основні характеристики вентилятора наведено на рисунках 2.13 -2.14.

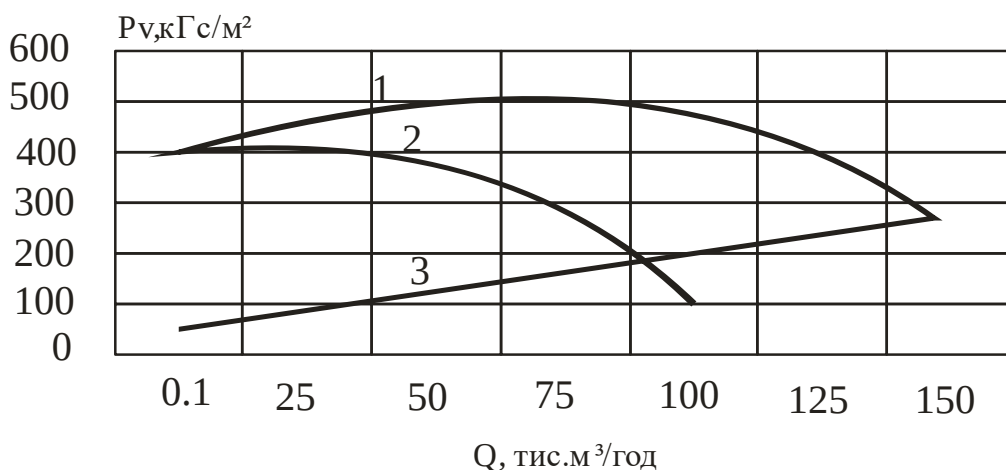


Рисунок 2.13- Напірна характеристика вентилятора: 1-2)- нерегульований привод (положення лопатей НА 0° та 50° відповідно); 3 – частотнорегульований ЕП вентилятора.

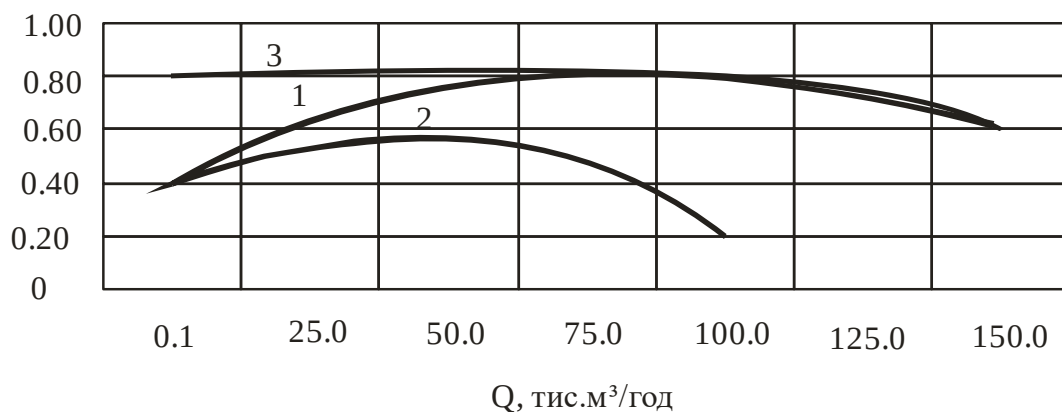


Рисунок 2.14 - ККД системи вентилятора: 1-2)- нерегульований привод (положення лопатей НА 0° та 50° відповідно); 3 – частотнорегульований ЕП вентилятора.

Крім підвищення ККД, використання регульованого привода для вентиляторів дає можливість, у ряді випадків, спростити конструкцію турбомашин, виключивши НА. Крім покращення енергетичних характеристик, суттєво змінюються експлуатаційні показники: подовжується міжремонтний цикл шляхом зниження механічних навантажень та зм'якшення пускових режимів, досить легко вибирається потрібний технологічний режим та забезпечується паралельна робота вентиляторів.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНОГО АЕП ВЕНТИЛЯТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Для визначення параметрів режиму роботи вентиляторної установки на основі ЧР асинхронного електропривода доцільно застосувати метод комп'ютерного імітаційного моделювання. Для реалізації цього методу спочатку потрібно розробити узагальнену структурну схему автоматичного керування (САК) режимом роботи ВУ, та здійснити розробку комп'ютерних імітаційних моделей (КИМ) окремих її елементів.

3.1 Узагальнена структурна схема САК рівнем тиску вентиляторної установки

На рис. 3.1 представлено узагальнену структурну схему САК рівнем тиску вентиляторної установки на основі ЧР асинхронного електропривода.

В схемі прийняті такі позначення:

ОК – об'єкт керування (ВУ);

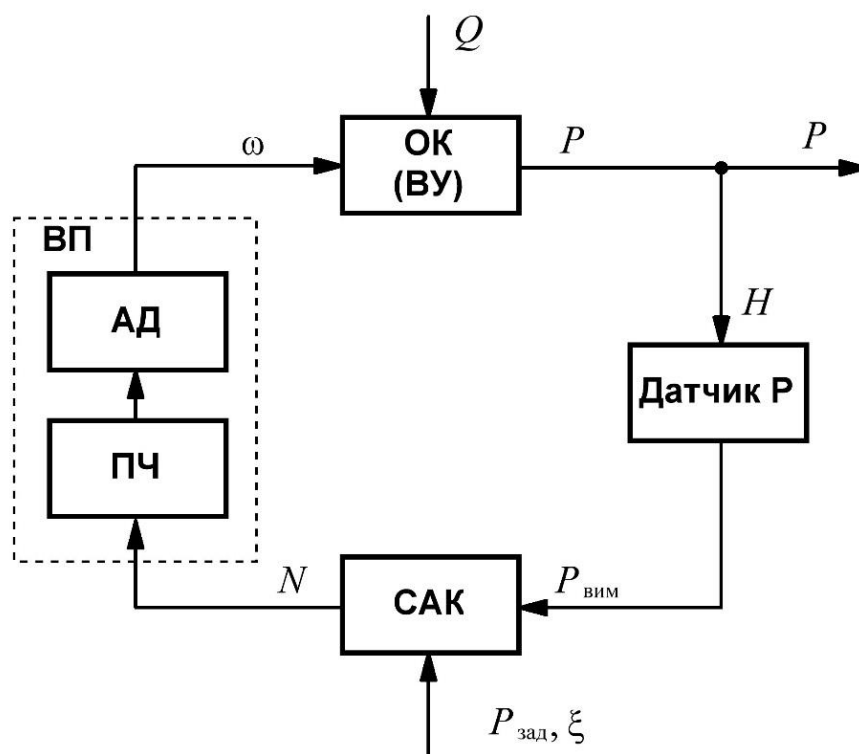
Датчик Р – датчик тиску;

ВП – виконавчий пристрій (ЧР асинхронний електропривод);

ПЧ – перетворювач частоти;

АД – асинхронний двигун;

САК – система автоматичного керування рівнем тиску (блок автоматичного керування);



Рисунку 3.1 - Узагальнена структурна схема САК рівнем тиску ВУ на основі ЧР асинхронного електропривода.

Q – значення напору повітря (або випадкове вхідне зовнішнє збурення), тис. м³/год;

P – значення тиску (вихідний сигнал об'єкта керування), м;

$P_{\text{вим}}$ – значення виміряного тиску;

N – швидкість обертання валу АД (вихідний сигнал для блоку автоматичного керування);

ω – значення кутової швидкості обертання (вхідний керуючий сигнал об'єкта керування), рад/с;

ξ – вектор задаючих параметрів САК;

$P_{\text{зад}}$ – значення заданого рівня напору в магістралі (або завдання керування), %.

Система працює наступним чином. Під дією зовнішнього збурення (або зміни подачі повітря Q) змінюється значення тиску вентиляторної установки. Показання датчику тиску надходить на вхід блоку керування, у якому відповідно

до обраного алгоритму автоматичного керування у залежності від величини помилки керування створюється вихідний керуючий сигнал N (що представляє собою необхідну частоту обертання валу двигуна). Керуючий сигнал N надходить на вхід виконавчого пристрою (ЧР асинхронного електроприводу), на виході якого формується значення сигналу для кутової швидкості обертання валу відцентрового вентилятору.

Для дослідження режимів роботи ВУ на основі ЧР асинхронного електроприводу при використанні методу комп'ютерного імітаційного моделювання, потрібно розробити комп'ютерні моделі елементів структурної схеми САК, тобто комп'ютерну модель об'єкту керування, блоку автоматичного керування та виконавчого пристрою.

3.2 Комп'ютерна імітаційна модель вентиляторної установки

Відповідно до структурної схеми, яка зображена на рис. 3.1, в якості об'єкту керування розглядається відцентровий вентилятор типу УДАЛ-ВОк-8-І-2.

Технічні дані вентилятору наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Технічні дані моноблочного вентилятору УДАЛ-ВОк-8-І-2.

Вентилятор	Електродвигун		L_w ,	L_1 ,
	марка	$P_{\text{ном}}$, кВт	дБА	мм
УДАЛ-ВОк-8-І-2	AIP180M2	30	107	1000

Відомо, що залежність тиску P від витрати Q представляє собою напірну характеристику вентилятора. Вид даної залежності залежить від моделі вентиляторної установки і вказується в технічній документації до ВУ, яка надається заводом-виробником, представлена таблицями чи графіками. Напірну характеристику (Q - P) вентиляторної установки УДАЛ-ВОк-8-І-2 представлено на рис. 3.2 у вигляді графіка.

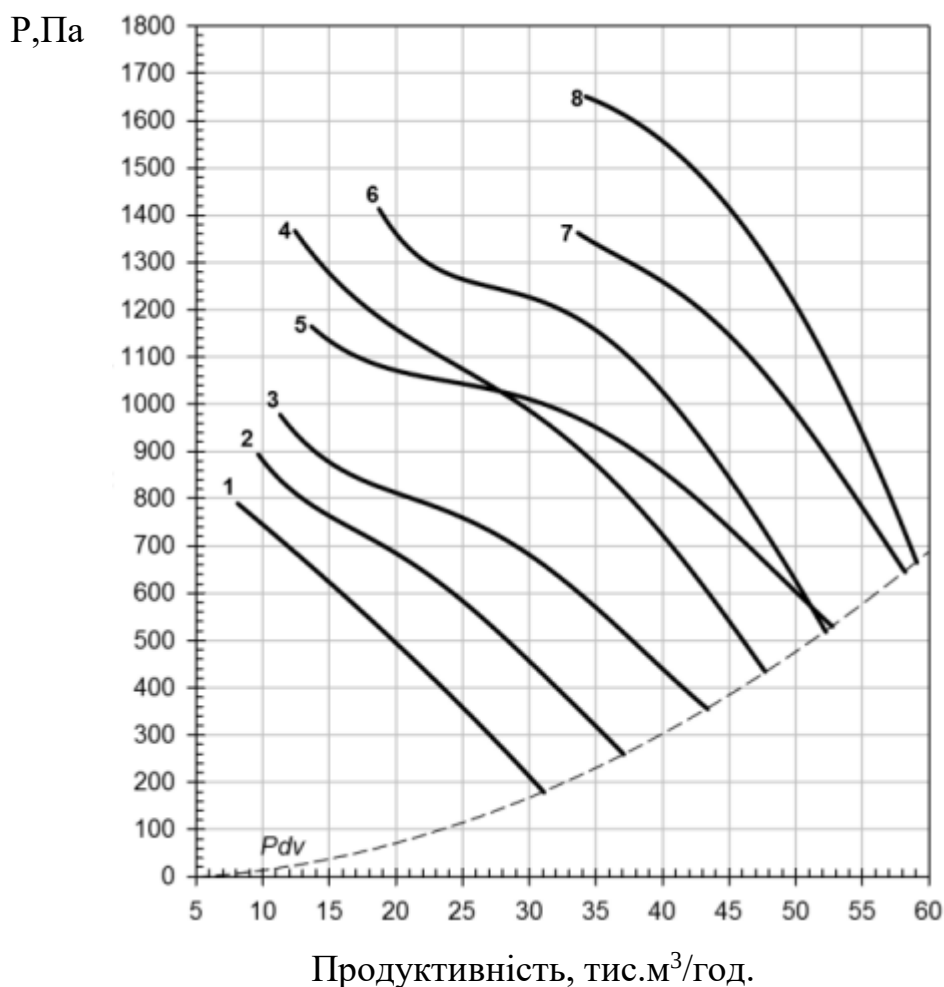


Рисунок 3.2 - Залежність Q - P характеристики вентилятора УДАЛ-Вок-8-I-2.

Застосування Q - P характеристик у вигляді таблиць або у вигляді графіків являється досить незручним для отримання його математичної моделі, краще скористатися аналітичним виразом, який описує Q - P характеристику ВУ.

Для визначення цього аналітичного виразу, який описує Q - P характеристику ВУ, було використано метод лінійного регресивного аналізу. Пропонується визначати аналітичний вираз, який описує Q - P характеристику ВУ у вигляді поліному другого порядку.

Залежності Q - P характеристики ВУ, що побудовані на основі каталожних даних і шляхом апроксимації у вигляді поліному 2-го порядку представлено на рис. 3.3.

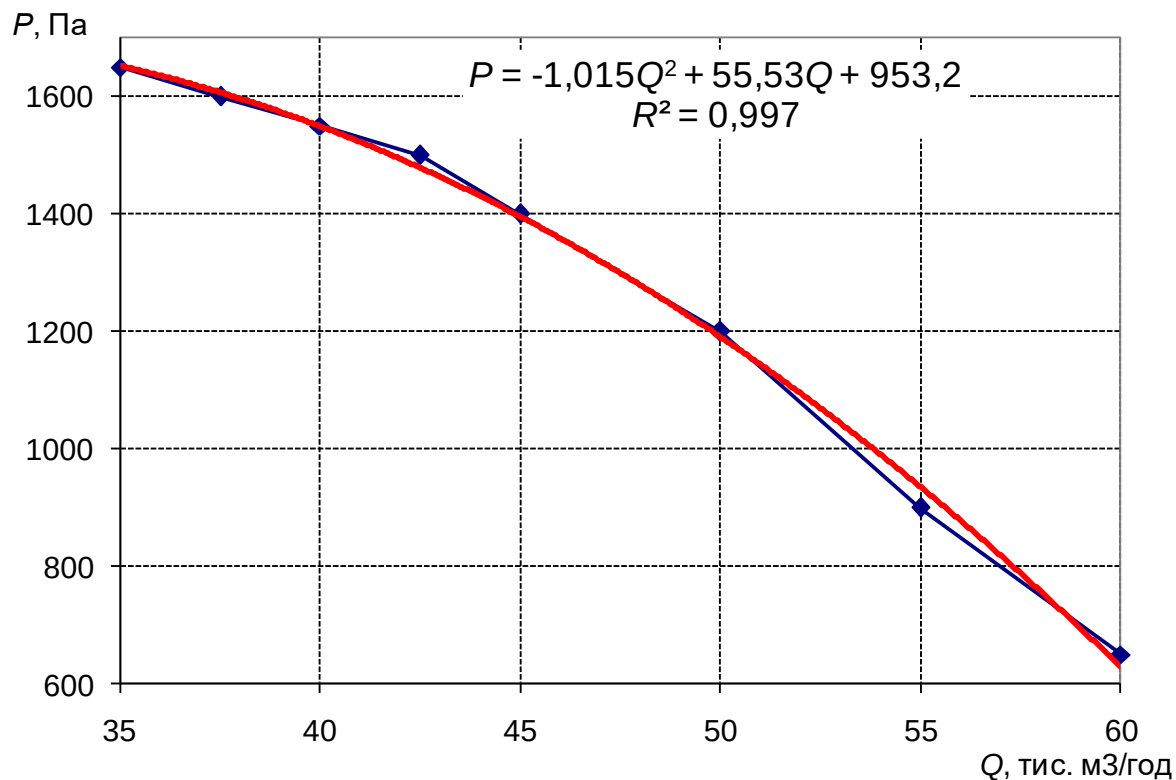


Рисунок 3.3 – Залежності Q - P характеристик ВУ: 1) – каталожні дані; 2) – їх апроксимація поліномом 2-го порядку.

З врахуванням принципу подібності, аналітичний вираз, який описує Q - P характеристику ВУ при довільній швидкості обертання визначається:

$$\begin{aligned}
 P(\omega, Q) &= (a_0 + a_1Q + a_2Q^2) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = \\
 &= (953,2 - 55,53Q - 1,015Q^2) \left(\frac{\omega}{303,68} \right)^2,
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

де P – значення величина тиску, м;

Q – значення подачі, м³/год;

ω – значення кутової швидкості обертання валу АД, рад/с;

$\omega_{\text{ном}}$ – номінальна кутова швидкість обертання валу АД, рад/с;

a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти регресії.

Залежності Q - P характеристик ВУ, та графіки залежностей, що їх апроксимують для різних частот обертання валу АД представлено на рис. 3.4.

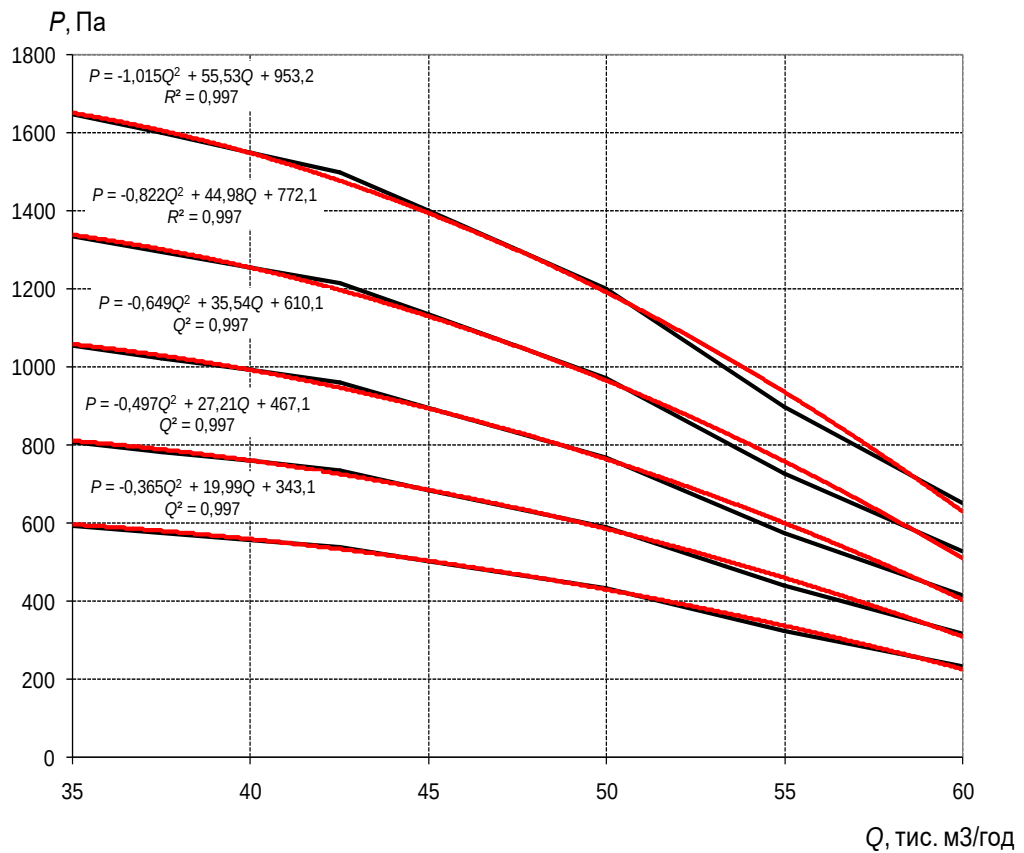


Рисунок 3.4 - Залежності Q - H характеристик ВУ для різних частот обертання валу АД та графіки залежностей, які їх апроксимують.

Аналітичний вираз (3.1) представляє собою математичну модель об'єкту керування. Потрібно відмітити, що затримку часу, яка виникає при регулюванні тиску при зміні подачі чи швидкості обертання, можна не враховувати, через її порівняно невелике значення. Тоді модель ОК можливо представити як безінерційну (підсилювальну) ланку. Реалізацію залежності (3.1) у вигляді комп'ютерної імітаційної моделі у програмі Matlab наведено в подальших розділах.

3.3 Комп'ютерна імітаційна модель частотнорегульованого АЕП

Комп'ютерна модель виконавчого пристрою САК, що зображена на рис. 3.1, умовно поділяється на 2 блоки: імітаційна модель ПЧ та імітаційна модель АД. Загальну структурну схему ЧР асинхронного електроприводу зображено на рис. 3.5.

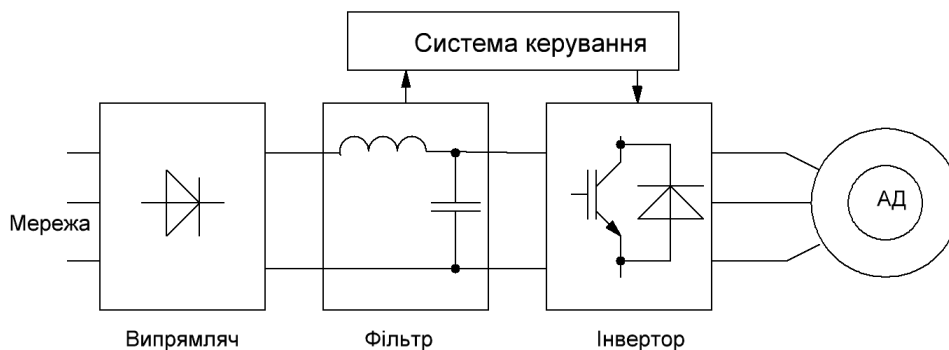


Рисунок 3.5 - Загальна структурна схема ЧР АЕП.

Відповідно до алгоритму керування швидкістю обертання валу АД (векторне чи скалярне керування) відрізняються моделі асинхронного частотного електроприводу.

Побудова точної імітаційної моделі ЧР асинхронного електроприводу являється достатньо складною інженерною задачею. Це пов'язано із складністю математичного опису процесів, які відбуваються в частотному перетворювачі через наявність у ньому великої кількості нелінійних елементів. Не менш складною науково-технічною задачею являється побудова математичної моделі АД, в якому динаміку процесів можна описати системою диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Для дослідження режимів скалярного ЧП асинхронного електроприводу в середовищі Matlab/Simulink доцільно скористатись блоком «Six-Step VSI Induction Motor Drive» бібліотеки SimPowerSystems. В основі зазначеного блоку є детальна математична модель трифазного ПЧ та модель асинхронного двигуна, що описується диференціальними рівняннями Парка-Горєва.

Зовнішній вигляд цього блоку наведено на рис. 3.6.

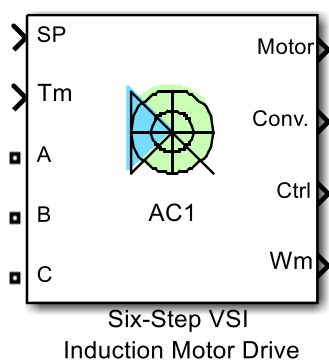


Рисунок 3.6 - Зовнішній вигляд блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive».

Узагальнену структурну схему для силової частини блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» зображено на рис. 3.7.

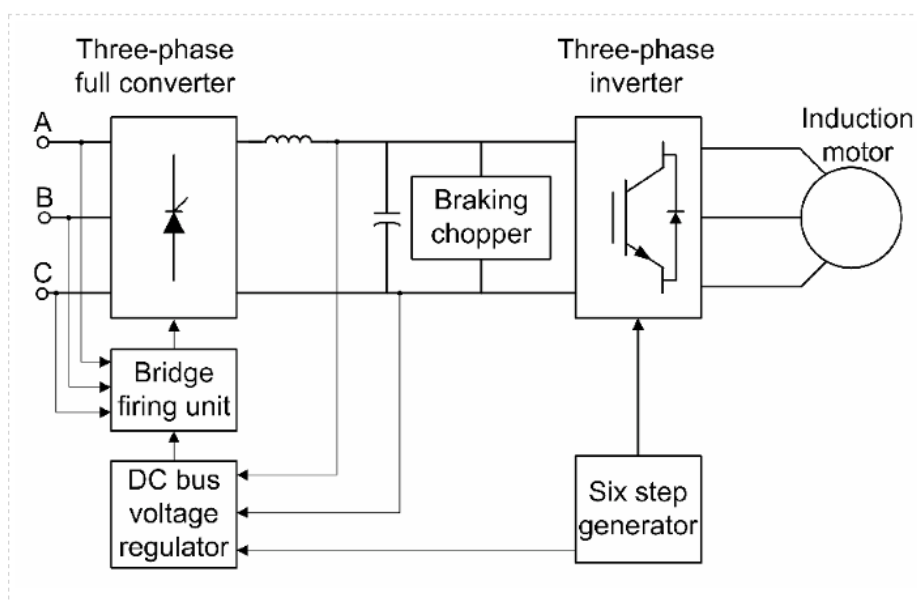


Рисунок 3.7 - Силова частина блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive».

Налаштування параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» проводиться у діалогових вікнах, які зображено на рис. 3.8.

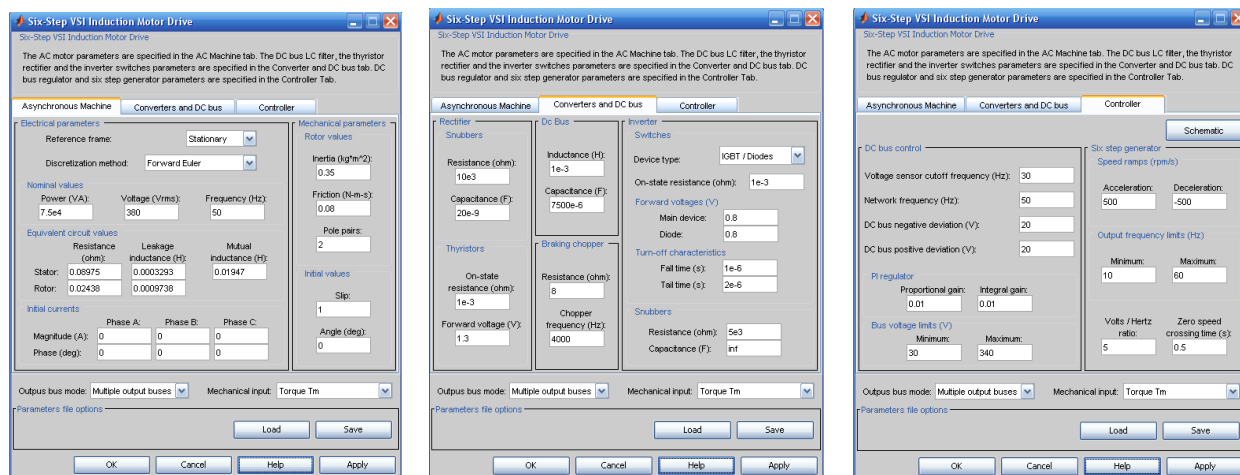


Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд діалогових вікон налаштування параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive».

У якості електродвигуна ВУ УДАЛ-ВОк-8-І-2 застосовується асинхронний двигун АІР180М2, $P_{\text{ном}} = 30$ кВт з частотою обертання 3000 об./хв. Технічні характеристики цього двигуна наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики АД вентилятора.

№	Марка двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	n , об./хв	$U_{\text{ном}}$, В	$\eta_{\text{ном}}$, -	$J_{\text{д}}$, кг·м ²	$\cos\phi$, -	$M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$, -	$M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$, -
1	АІР 180 М2	30	2950	380	0,914	0,07	1,15	2,0	2,3

Параметри комп'ютерної моделі вибраного АД розраховані з використанням функції Matlab «power_Asynchronous Machine Params». Ця функція має зручний графічний інтерфейс та дозволяє розраховувати параметри моделі АД за його паспортними даними.

Аналітичний вираз, яким описується механічна характеристика відцентрового вентилятору має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 M_c &= M_0 + (M_{\text{ном}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = 2,93 + (97,78 - 2,93) \left(\frac{\omega}{314,16} \right)^2 = \\
 &= 2,93 + 94,85 \cdot \left(\frac{\omega}{314,16} \right)^2
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

де M_c – значення механічного моменту на валу АД, Н·м;

$M_{\text{ном}}$ – значення номінального моменту АД, Н·м;

M_0 – значення моменту на валу АД при неробочому ході:

$$M_0 = 0,03 \cdot M_{\text{ном}} = 0,03 \cdot 97,78 = 2,93 \text{ Н·м.}$$

Реалізацію блоку, який моделює механічну характеристику ВУ в середовищі Simulink приведено в наступних розділах.

3.4 Синтез системи автоматичного регулювання тиску вентиляторної установки

Існує декілька різних підходів до реалізації САК рівнем напору у магістралі насосної станції. Найбільш поширеними являються:

1. Підхід, що заснований на застосуванні пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД).

2. Оптимальне керування, яке базується на принципах максимуму Понтрягіна чи динамічного програмування Белмана.

Застосування оптимальних регуляторів автоматичного керування швидкістю обертання валу АД (тобто, рівнем напору в магістралі) являється більш досконалим підходом, але він не знайшов широкого розповсюдження. В основному, використовуються ПІД закони регулювання. Це можна пояснити високим ступенем складності розробки оптимальних систем керування та їх налаштування.

Виходячи з цього, САК рівнем тиску вентиляторної установки доцільно реалізувати на підставі пропорційно-інтегрально-диференційного закону керування.

Для керування рівнем тиску ВУ, швидкість перехідного процесу не являється визначальною величиною. Тому, для даного розрахунку використання диференційної складової ПІД закону ПІД регулювання не являється обов'язковим.

Потрібно виконати наступні операції для рішення задачі синтезу ПІ регулятора рівнем тиску ВУ:

1. Враховуючи, що ПІ-регулятор належить до лінійних систем автоматичного керування, потрібно провести лінеаризацію нелінійних елементів для структурної схеми САК, точніше, об'єкту керування і виконавчого пристрою поблизу робочої точки.

2. Використати відомий метод синтезу ПІ-регуляторів.

Відомо, що ЧР асинхронний електропривод у першому наближенні можна представити послідовно з'єднаною аперіодичною ланкою першого порядку і ланкою чистого запізнювання. Результуюча передаточна функція ЧР асинхронного електроприводу виглядає наступним чином:

$$W_{\text{ЧП}}(p) = \frac{k_m}{T_1 p + 1} e^{-p\tau} \quad (3.3)$$

де k_m – значення коефіцієнту підсилення;

T_1 – значення постійної часу, с.

Значення величин k_m і T_1 знаходяться розрахунковим шляхом чи експериментально. У випадку моделювання вентилятору моделі УДАЛ-Вок-8-І-2 у відносних одиницях ці величини приймають наступні значення: $k_m = 1$; $T_1 = 0,093$ с.

Головною задачею синтезу ПІ регулятора являється розрахунок його коефіцієнтів для пропорційної та інтегральної складових.

Вирішення цієї задачі можливе кількома методами:

1. Метод ручного вибору коефіцієнтів для пропорційної і інтегральної складових.
2. Інженерні методи, які засновані на використанні таблиць і довідкових даних.
3. Метод синтезу ПІ регулятора з використанням комп'ютерних імітаційних моделей САК.

В кваліфікаційній роботі був застосований підхід до синтезу ПІ-регулятора, що заснований на третьому методі. На рис. 3.9 наведено структурну схему лінеаризованої моделі САК тиску ВУ.

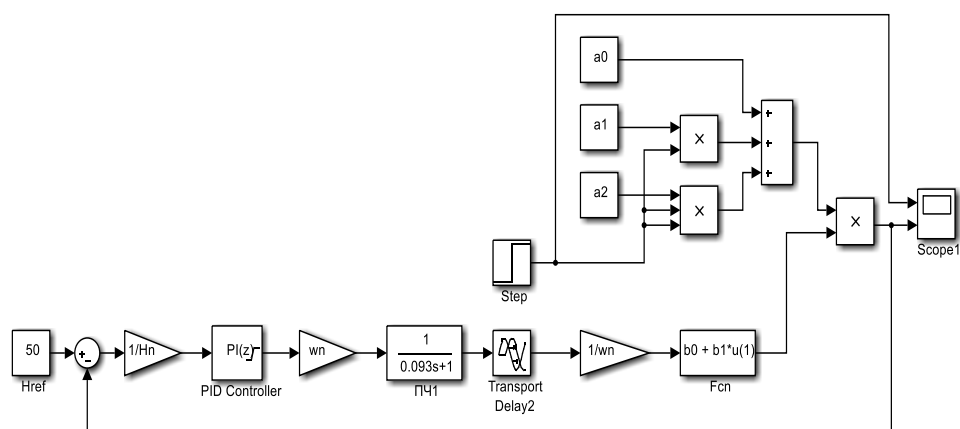


Рисунок 3.9 - Структурна схема лінеаризованої моделі САК тиску ВУ.

В блоці “PID Controller” виконується алгоритм ПІ регулювання. Вікно налаштувань цього блоку зображено на рис. 3.10.

Аналіз рис. 3.10 показує, що в даному блоці використовується пропорційно-інтегральний закон керування у дискретному вигляді. Для виконання автоматичного налаштування коефіцієнтів вибраного ПІ регулятора потрібно скористатись інструментом «PID tuner» за допомогою кнопки «Tune...» в діалоговому вікні блоку налаштувань “PID Controller”. Зовнішній вигляд цього діалогового вікна інструменту «PID tuner» зображений на рис. 3.11.

Значення коефіцієнтів ПІ регулятора, що отримані за такими розрахунками: $K_i = 1,6151$; $K_p = 0,1631$.

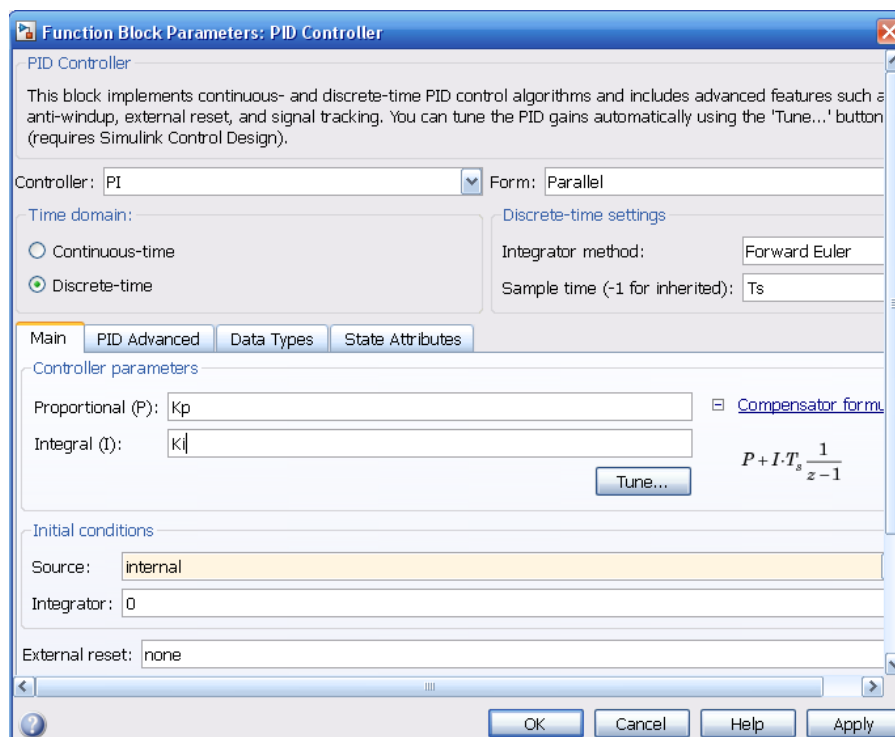


Рисунок 3.10 - Вікно налаштувань блоку “PID Controller”

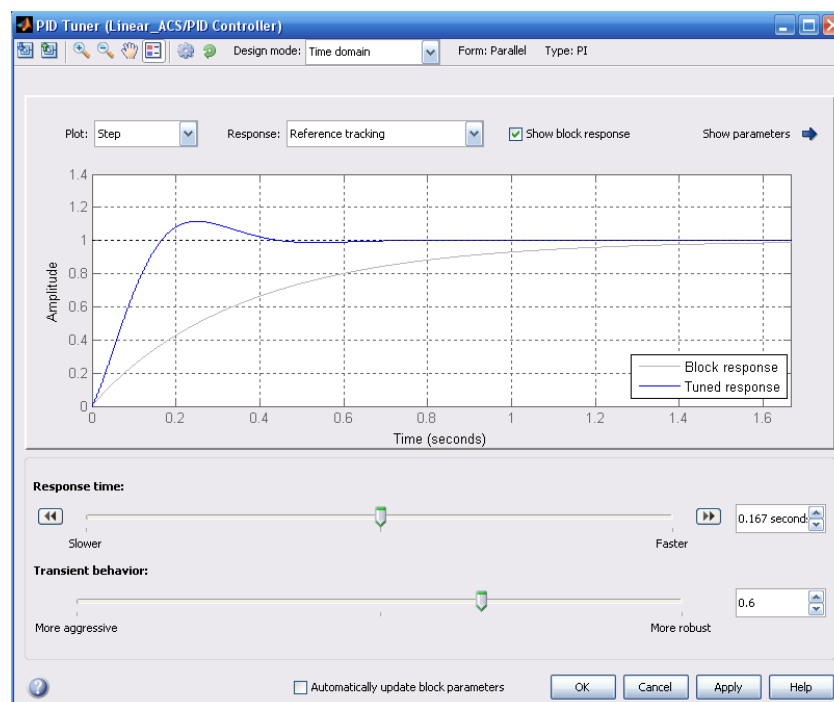


Рисунок 3.11 - Зовнішній вигляд діалогового вікна інструменту «PID tuner»

Використання математичного пакету Matlab/Simulink допомагає в зрозумілій формі налаштовувати потрібні характеристики перехідного процесу САК.

3.5 Узагальнені комп'ютерні імітаційні моделі ЧР електроприводу вентиляторної установки

Узагальнену комп'ютерну імітаційну модель, у випадку скалярного автоматичного керування рівнем тиску ВУ на основі ЧР асинхронного електроприводу зображено на рис. 3.12.

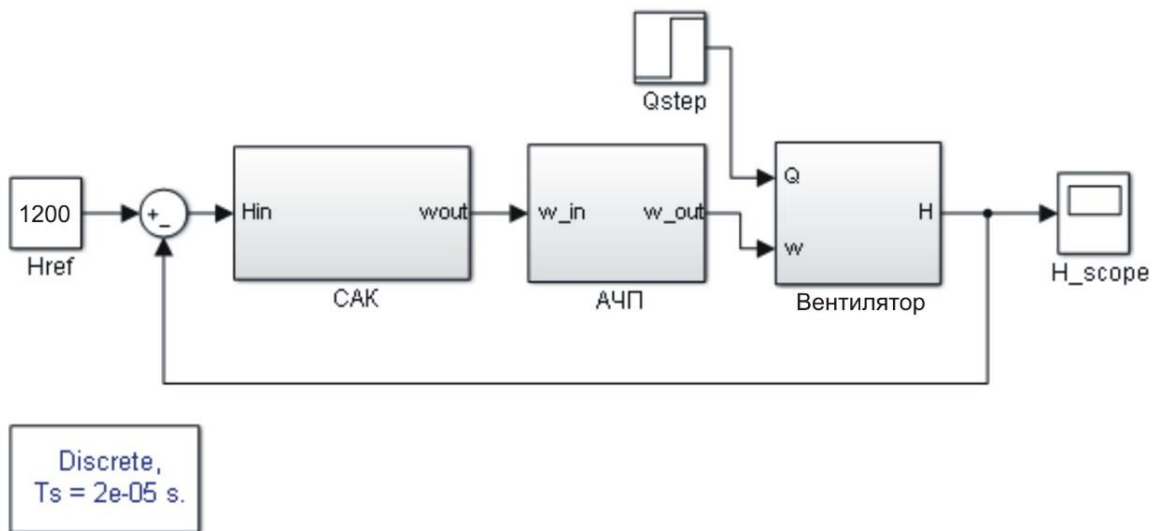


Рисунок 3.12 - Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель для скалярного автоматичного керування рівнем тиску на основі ЧР АЕП.

Модель блоку «САК» представлено на рис. 3.13.

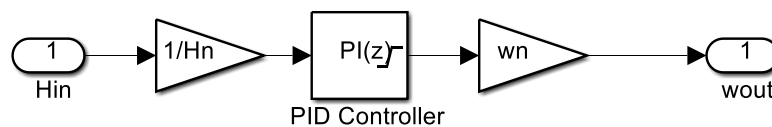


Рисунок 3.13 - Модель блоку «САК».

Модель блоку «Вентилятор» зображено на рис. 3.14.

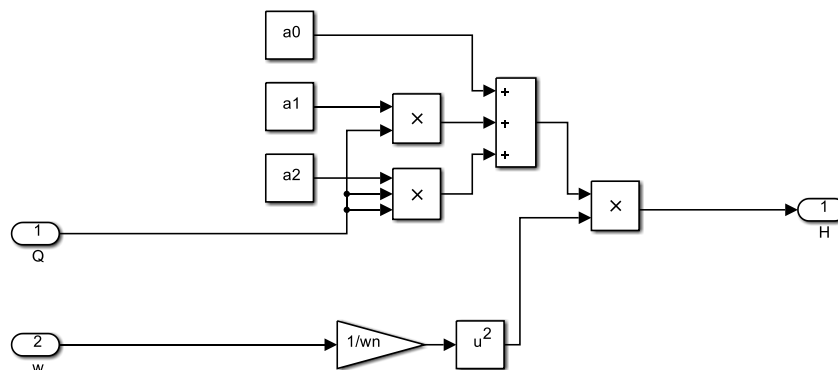


Рисунок 3.14 - Модель блоку «Вентилятор»

Модель блоку «АЧП» зображено на рис. 3.15.

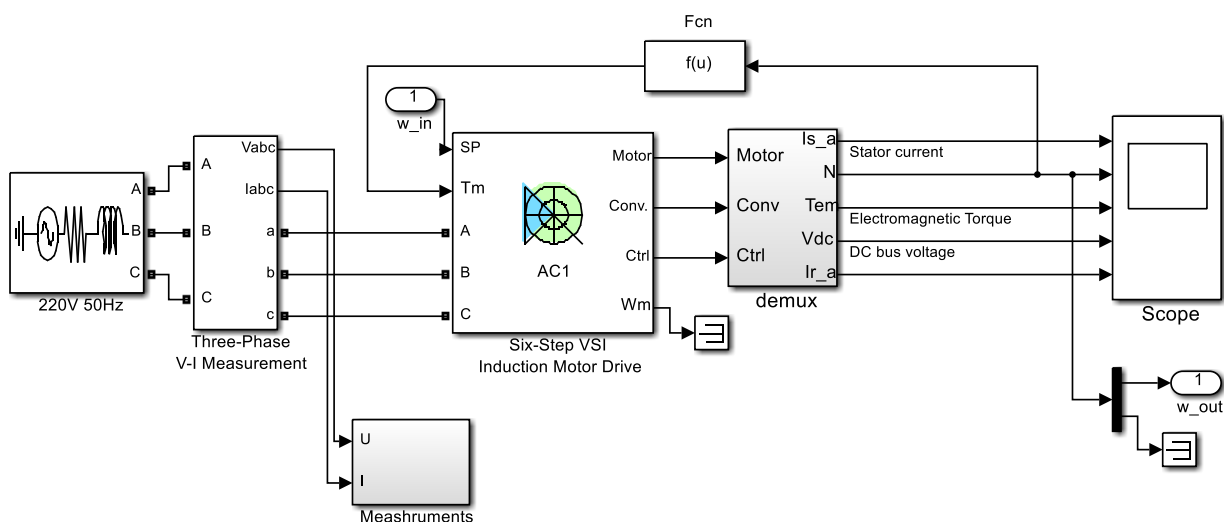


Рисунок 3.15 - Модель блоку «АЧП»

Інформацію щодо призначення окремих блоків в моделі, та принципів функціонування наведено в [18].

3.6 Комп'ютерне імітаційне моделювання режимів роботи ЧР електроприводу вентиляторної установки

При роботі вентиляторної установки необхідно підтримувати постійний тиск, незалежно від зміни продуктивності насосу.

На рис. 3.16-3.17 наведено, як змінюється тиск у разі зміни продуктивності вентилятору. У момент часу $t_1=8,0$ с проходить зміна тиску з $P_{\max}$ до $P_{\min}$, у цьому

випадку, напір знижується до $0,875P$ м, а в момент часу $t_2=12$ с тиск відновлюється.

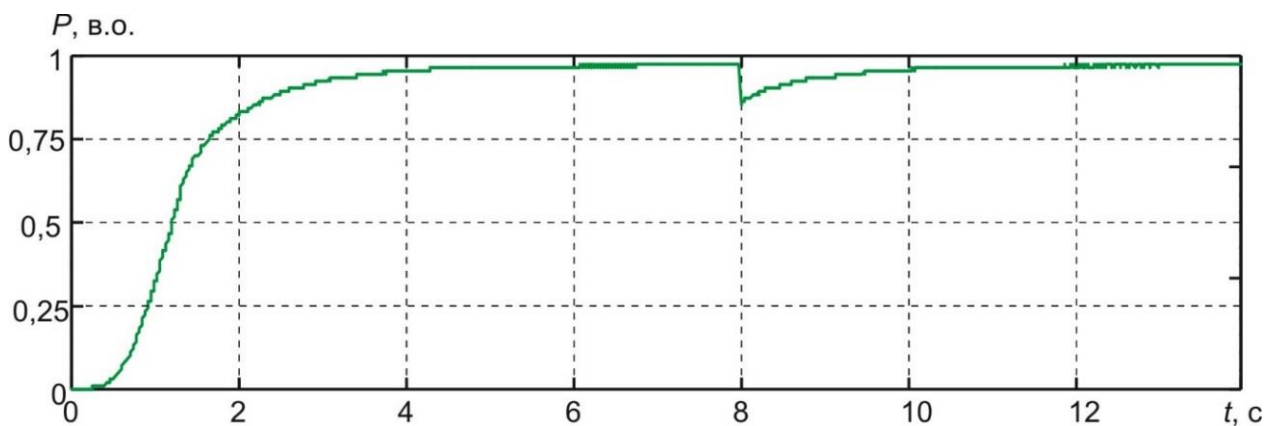


Рисунок 3.16 - Графік зміни тиску ВУ.

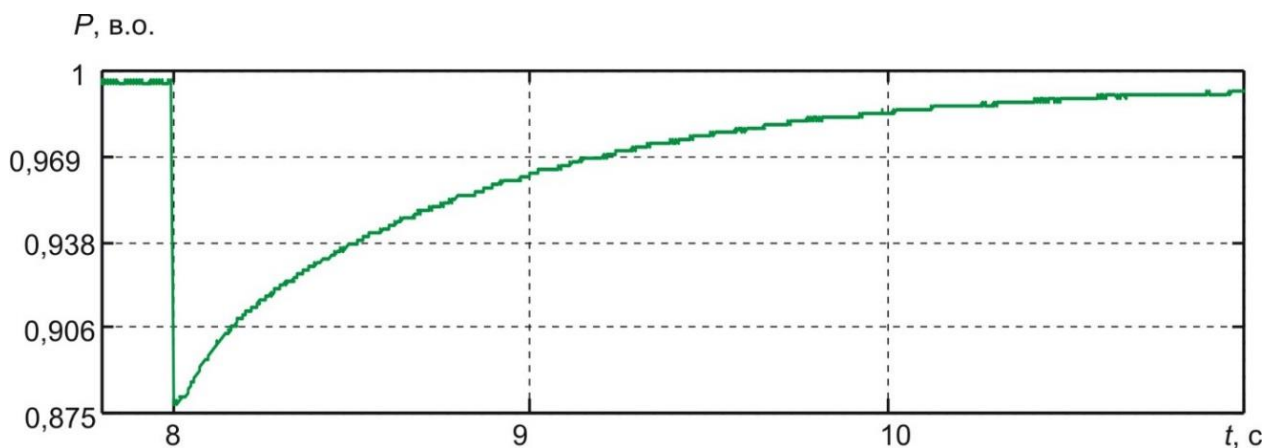


Рисунок 3.17 - Зображення зміни тиску ВУ у збільшеному масштабі.

Розглянемо, процеси, що відбуваються в системі «перетворювач частоти-асинхронний двигун». В результаті моделювання отримані залежності моменту і швидкості у функції часу, які зображено на рис.5.18 - 5.20. Розглядався пуск на холостому ході при $M_c=0$, наброс навантаження $M_c=M_n$, у момент часу $t = 8$ с відбувалася зміна витрати з $Q_{\min}$ до $Q_{\max}$.

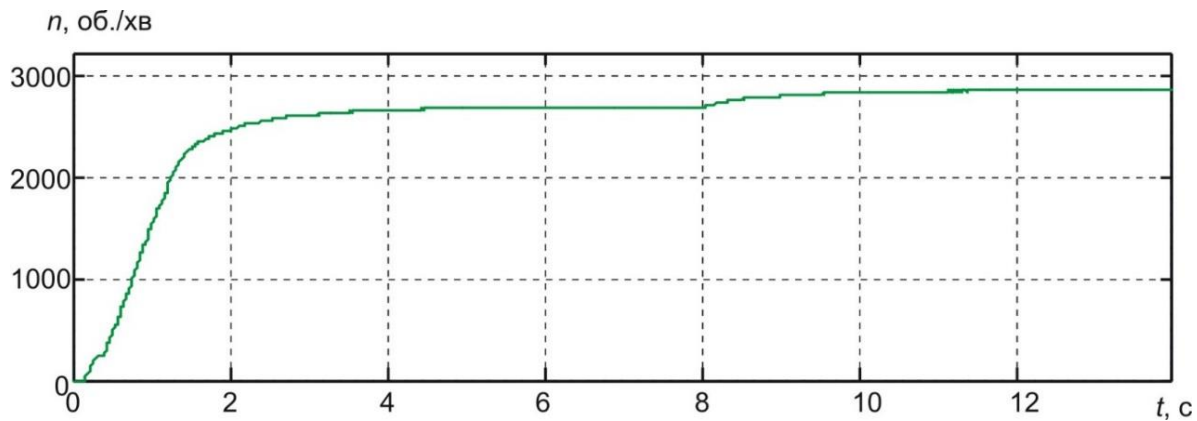


Рисунок 3.18 - Залежність зміни частоти обертання валу ВУ.

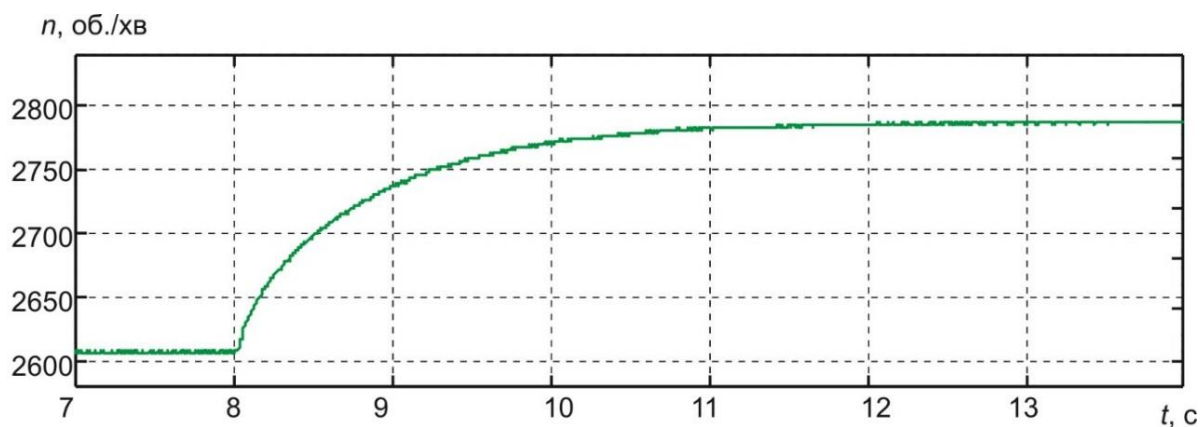


Рисунок 3.19 - Залежність зміни частоти обертання валу ВУ (збільшений масштаб)

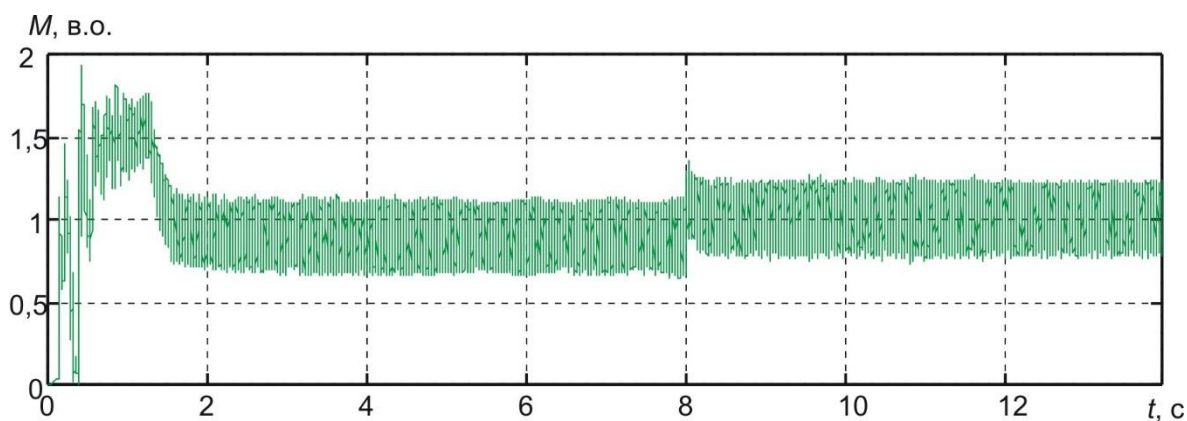


Рисунок 3.20 - Залежність зміни електромагнітного моменту M_{em} в функції часу для АД ВУ при пуску на неробочому ході та набросі навантаження.

На рис. 3.21 представлено залежність зміни струму статора АД у функції часу, на рис. 3.22 – залежності зміни активної потужності у часі.

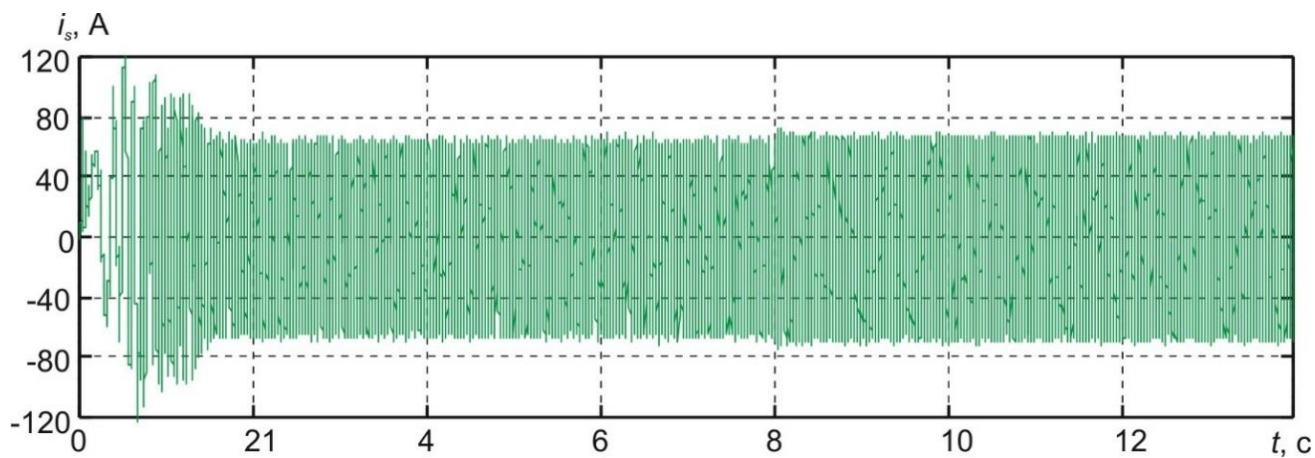


Рисунок 3.21 - Графік зміни струму статора i_s у функції часу.

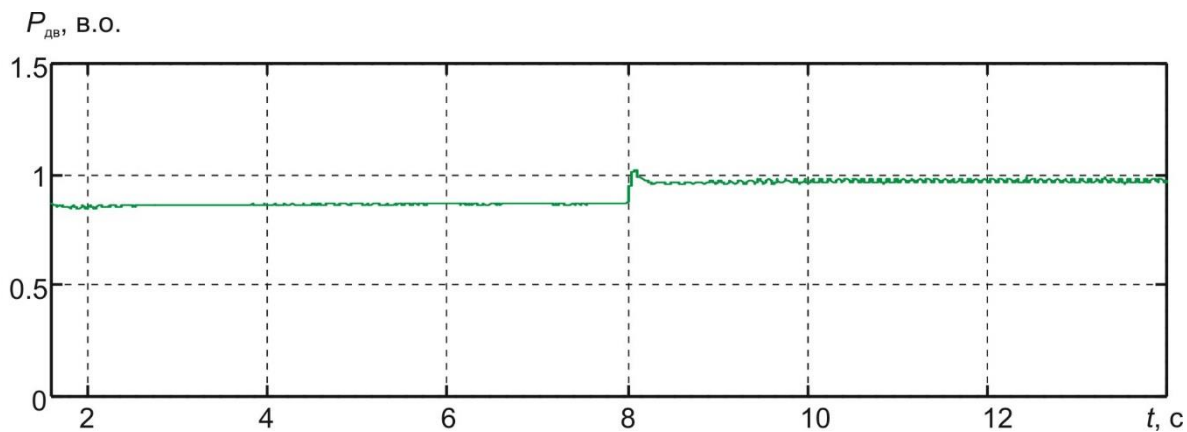


Рисунок 3.22 - Залежності зміни активної потужності P (в.о.).

На рис. 3.23 представлено механічні характеристики АД потужністю 30 кВт при фіксованих частотах.

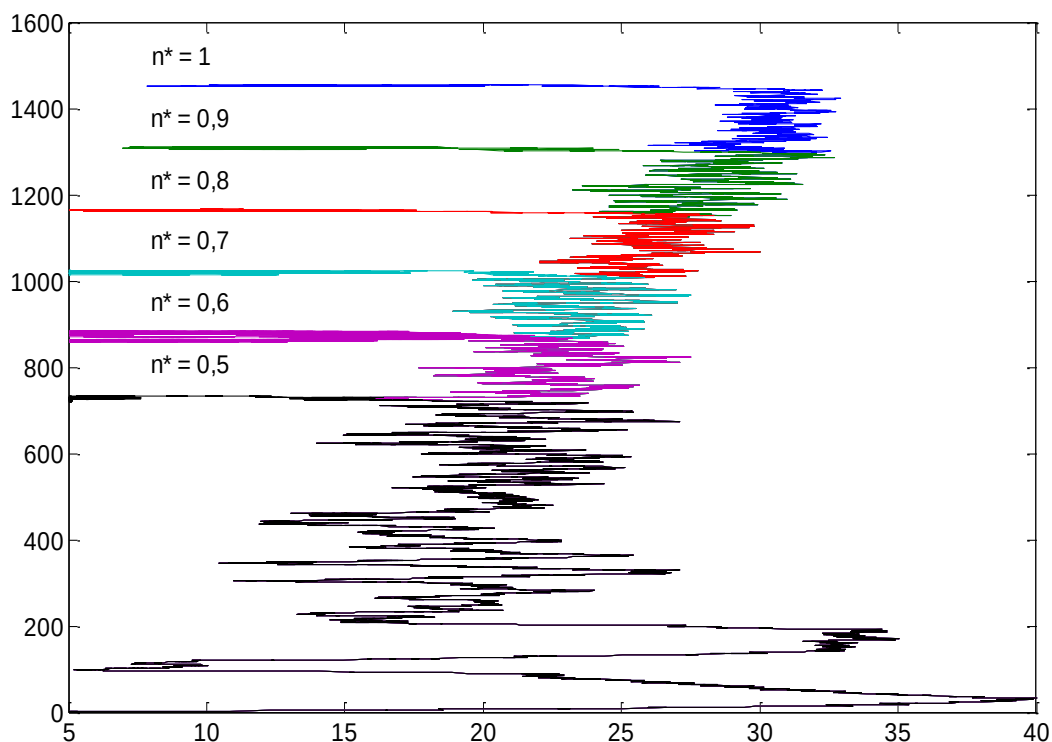


Рисунок 3.23 - Механічні характеристики ЧР асинхронного електропривода при різних частот обертання (скалярний закон керування).

Отримані механічні характеристики показують, що зміна частот у діапазоні $0,5 \leq \omega_{1*} \leq 1$ практично не впливає на зміну критичного моменту та критичне ковзання двигуна.

При подальшому зменшенні частоти ω_{1*} , механічні характеристики погіршуються, критичний момент зменшується, при цьому, критичне ковзання збільшується.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧР АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ОЕВ

4.1 Оцінка економічної ефективності впровадження ПЧ

У попередніх розділах кваліфікаційної роботи було розглянуто застосування регульованого електроприводу для основного технологічного обладнання олійноекстракційного виробництва, а саме для вентиляторів, транспортерів та насосів. На прикладі окремих технологічних установок була розрахована можлива економія електроенергії. В цьому розділі надаємо техніко-економічну оцінку застосування цих заходів з врахуванням капіталовкладень, амортизаційних витрат та визначимо термін окупності даних заходів.

Переважає застосування ПЧ в системах керування електродвигунами зумовлено отриманням економічного ефекту. Суттєвий ефект отримується при керуванні ЧП електродвигунів насосної установки.

Визначення економічної ефективності являється насущною проблемою. Бажано, до встановлення ПЧ мати гарантію окупності витрачених засобів. Виконання оцінки економічної ефективності надається на прикладі конкретних пристроїв. Можливо застосування як складних математичних обчислень, так і даних, які отримані експериментальними методами.

Питання економії споживання енергоресурсів для різних видів обладнання розглядаються в економічній та технічній літературі. Але, частіше обмежуються лише економією електроенергії чи тепла, не виконуючи оцінку повного економічного ефекту, що складається як з економії споживання енергоресурсів, так і вигоди, яка отримується за рахунок зменшення кількості аварій, термінів простою обладнання, зменшення чисельності обслуговуючого персоналу.

Можна стверджувати, що економія від застосування перетворювачів частоти на виробництві досягається за рахунок:

- заощадження споживання електроенергії;
- скорочення технологічних втрат;
- зменшення витрат, що пов'язані з ремонтними роботами та скорочення термінів простою устаткування.

Заощадження споживання електроенергії в насосних установках можливо отримати за рахунок того, що в НА, як і у вентиляційних установках, момент навантаження на валу електродвигуна збільшується разом зі збільшенням швидкості обертання. Механічні характеристики відцентрових насосів і вентиляторів, мають квадратичну залежність, тобто швидкість обертання збільшується пропорційно до квадрату моменту навантаження, що під'єднується до валу двигуна. Тоді, споживана двигуном потужність представляє кубічну залежність від швидкості обертання. Це означає, що невелике зниження обертання двигуна дає значний виграш в потужності. Саме тому, заощадження електроенергії являється головною перевагою застосування регульованого електроприводу насосних та вентиляторних механізмів.

4.2 Економічна ефективність впровадження ЧР електроприводу насосних установок

В кваліфікаційній роботі розглядається насосна станція олійноекстракційного підприємства, що працює зі змінним графіком водопостачання. На цій станції встановлено насосний агрегат: НКР-G 65-330/328/90/2 з потужністю двигуна $P_{ном}=90$ кВт. Регулювання продуктивності НС здійснюється за допомогою перетворювача частоти: ATV610D90N4.

Капіталовкладення, які обумовлені застосуванням РЕП в насосних установках, визначаються типом електроприводу і його потужністю. На рис. 4.1 надано залежності капітальних вкладень від значення потужності найбільш розповсюджених РЕП. Дані залежності використовуються для попередньої оцінки витрат для прийняття технічних рішень. Низьковольтні частотні

перетворювачі, що плануються до встановлення на підприємстві мають позначення -1.

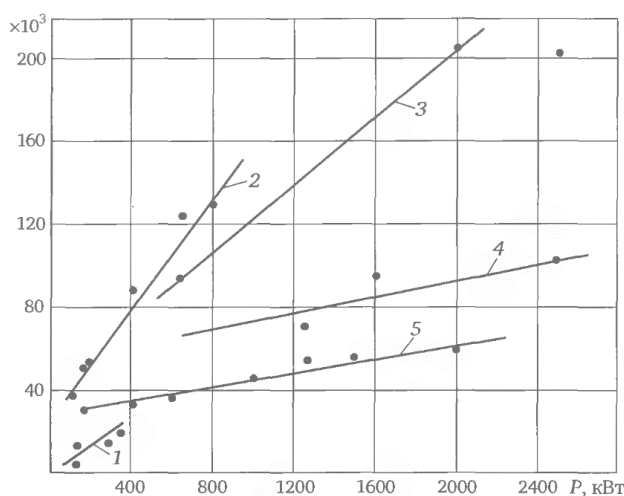


Рисунок 4.1 – Залежності капіталовкладень від значення потужності найбільш розповсюджених РЕП.

Інші РЕП:

- 2 - високовольтні ЧП з подвійною трансформацією напруги;
- 3 - високовольтні безтрансформаторні ЧП;
- 4 - високовольтні безтрансформаторні перетворювачі за системою вентильного електродвигуна;
- 5 – гідравлічні варіатори.

Визначення величини капіталовкладень за варіантами роботи насосної станції. До капіталовкладень відноситься: вартість обладнання, витрат на його доставку, монтаж та пусконаладжувальні (п/н) роботи.

$$K = B_{обл} + B_{д} + B_{м} + B_{пн} \quad (4.1)$$

де $B_{обл}$ – вартість обладнання, грн. За даними фірми-виробника, вартість пристрою ПЧ ATV610D90N4 складає 184121 грн. ;

$B_{д}$ – вартість доставки, грн. У розрахунках приймається у розмірі 10% від вартості обладнання;

Вм. – вартість монтажних робіт із врахуванням вартості монтажних матеріалів, грн. Приймається 35% від вартості обладнання.

Впн. – вартість п/н робіт, грн. Приймається у розмірі 15% вартості обладнання.

Значення капіталовкладень:

$$K = 184121 + 184121 \cdot 0,6 = 294593,6 \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат. Визначимо експлуатаційні витрат при умові роботи системи протягом року для 2-х варіантів: у першому варіанті насосна установка працює без перетворювача частоти, у другому варіанті використовується регулювання швидкості обертання АД насосної установки.

Кошторис річних експлуатаційних витрат розраховується за наступними статтями:

- основна та додаткова заробітна плата (ЗП) експлуатаційних робітників;
- поточні ремонти;
- вартість експлуатаційних матеріалів;
- амортизаційні відрахування;
- аварійні ремонти;
- інші витрати.

Заробітну плату експлуатаційних робітників (основну та додаткову), розраховують з відрахуваннями на соціальні потреби:

$$Z_{\text{екс}} = Q_{\text{мо}} \cdot l_c \cdot K_o \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100}\right) \quad (4.2)$$

де $Q_{\text{мо}}$ – річна трудомісткість експлуатаційних робіт. По першому варіанту вона складає 610 люд.-год. У другому варіанті: зменшується на 20% (за рахунок автоматизації процесів керування електродвигунами), збільшується

на 48 люд.-год. (за рахунок трудомісткості обслуговування частотного перетворювача), і складає 536 люд.-год.

l_c – середня погодинна тарифна ставка (ТС) експлуатаційних робітників, грн/год;

K_∂ – коефіцієнт додаткової ЗП, що враховує всі види грошових доплат, приймається 1,1-1,2.

H – значення нормативу єдиного соціального внеску, приймається 22%.

Розрахунок виконуємо для першого варіанту:

$$З_{експ.1} = 610 \cdot 44,86 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 36575,94.$$

Вартість експлуатаційних матеріалів приймаємо у розмірі 25% від $З_{екс.}$:

$$З_{експ.мат.1} = 0,25 \cdot 36575,94 = 9143,98.$$

Витрати на поточний ремонт обладнання враховують основну та додаткову ЗП ремонтних робітників із відрахуваннями до соціальних фондів:

$$З_p = 0,8 \cdot Q_p \cdot l_{cp} \cdot K_\partial \left(1 + \frac{H_{соц}}{100}\right), \quad (4.3)$$

де 0,8 – коефіцієнт, що враховує долю поточних ремонтів у загальній вартості ремонтних робіт;

Q_p – річна трудомісткість ремонтних робіт. Розраховується відповідно до нормативів системи ПЗР, розрахунок наведено у таблиці 4.1.

l_{cp} – середня погодинна тарифна ставка ремонтних робітників, грн./год.

$$З_{p.1} = 0,8 \cdot 1612 \cdot 57,28 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 99131,24.$$

Вартість ремонтних матеріалів приймається 60% від $З_p$:

$$З_{p.мат.1} = 0,6 \cdot 99131,24 = 59478,75.$$

Таблиця 4.1 - Розрахунок трудомісткості ремонтних робіт.

Назва елементів насосної	Кількість, шт.	Тривалість, міс			Структура ремонтного циклу			Трудомісткість, нормо-год.							
								Нормативна			Ремонтного циклу				Річна
		$T_{p.ц.},$ міс.	$T_{p.н.},$ міс.	$T_{o.н.},$ міс.	n_k	n_m	n_o	Q_k^H	Q_m^H	Q_o^H	Q_k	Q_m	Q_o	Q^Σ	Q_p
	Перший варіант														
Асинхронний двигун 90 кВт АІР250S4	1	60	6	0	1	10	0	375,0	204,0	0,0	375,0	2040,0	0,0	1395,0	483,0
Насосна установка	1	24	4	0	1	5	0	560,0	340,0	0,0	560,0	170,0	0,0	2260,0	1130,0
Всього															1613,0
Другий варіант*															
Асинхронний двигун 90 кВт	1	108	9	0	1	11	0	375,0	204,0	0,0	375,0	2244,0	0,0	2619,0	291,0
Насосна установка	1	60	12	0	1	4	0	560,0	340,0	0,0	560,0	1360,0	0,0	1920,0	384,0
ПЧ АТV610D90N4	1	120	24	6	1	4	16	295,0	148,0	14,8	295,0	592,0	236,8	1123,8	112,4
Всього															787,40

* У другому варіанті, через встановлення ПЧ тривалість ремонтного циклу і міжремонтного періоду можливо збільшити зі збереженням рівня надійності системи.

Річна вартість спожитої електроенергії розраховується за формулою:

$$B_{ел.} = b \cdot Wh \cdot 250$$

де b – тариф на електроенергію, грн/кВт год ;

Wh – добове споживання електроенергії НУ, кВт год;

$$B_{ел.1} = 6,56 \cdot 985 \cdot 250 = 1615400 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування розраховуються за капіталовкладеннями і річною амортизаційною нормою ($H_a\%$), яка складає 25%. Розраховуються тільки для другого варіанту.

$$A_{відр.1} = \frac{294593,6 \cdot 25}{100} = 73648,4 \text{ грн.}$$

Інші витрати приймаються 10% від Z_p :

$$I_{в.1} = 0,1 \cdot 59478,75 = 5947,87 \text{ грн.}$$

Розрахунок річних експлуатаційних витрат по другому варіанту виконується аналогічно. Кошторис річних експлуатаційних витрат за варіантами схеми представлено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Кошторис річних експлуатаційних витрат для НС.

№	Стаття витрат	Витрати	
		Перший варіант	Другий варіант
1	Основна та додаткова ЗП експлуатаційних робітників із відрахуваннями, грн.	36575,94	32138,86
2	Вартість спожитої електроенергії, грн.	1615400	1292320
3	Вартість експлуатаційних матеріалів, грн.	9143,98	8034,72
4	Поточні ремонти, грн.	99131,24	48421,79
5	Амортизаційні відрахування, грн.	0	73648,4
6	Інші витрати, грн.	5947,87	2905,3
	Всього	1766199,04	1457469,07

Розрахунок показників економічної ефективності. Інвестиційні вкладення вважаються доцільними, коли додатковий грошовий потік, отриманий від реалізації проекту, забезпечує повернення початкової суми і необхідну віддачу на вкладений капітал.

Як правило, критерієм для прийняття рішення, яке оцінює проекти тільки за витратами, приймають показник еквівалентних річних витрат (ЕРВ). Ефективнішим вважається проект, який має найменші витрати та надає той самий результат.

ЕРВ визначають наступним чином [33]:

$$EPB = \frac{K + \sum_{t=1}^n \frac{3_t}{(1+i/100)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i/100)^t}}, \quad (4.4)$$

де $1/(1+i/100)^t$ – фактор теперішньої вартості вибирається з таблиць [33].

Термін служби проектів, які порівнюються складає 10 років, ставка дисконту приймається на рівні 9%.

$$EPB_{1вар.} = \frac{0 + 1766199,04 \cdot 6,42}{6,42} = 1766199,04;$$

$$EPB_{2вар.} = \frac{294593,6 + 1457469,065 \cdot 6,42}{6,42} = 1503384,526.$$

Розрахунок показника ЕРВ по різних варіантах насосної станції наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Приведені витрати по варіантах

№	Назва витрат	Варіант 1	Варіант 2
1	Капіталовкладення, грн	0	294593,6
2	Поточні витрати, грн	1766199,04	1457469,07
3	Еквівалентні річні витрати, грн	1766199,04	1503384,53

За показником ЕРВ кращим являється варіант встановлення ПЧ для регулювання продуктивності насосної станції.

Термін окупності цього заходу можна розрахувати за формулою:

$$T_{ок.} = \frac{294593,6}{1766199,04 - 1503384,53} = 1,12 \text{ року.}$$

Розрахунки показують, що впровадження на ОЕВ частотнорегульованого приводу АД насосної установки являється економічно обґрунтованим. Значення річної економії експлуатаційних витрат складає 308729,9 грн., а період окупності капіталовкладень 1,12 року.

Встановлення перетворювача частоти дозволяє заощаджувати електроенергію та зменшувати негативний вплив на обладнання насосної станції, що, в свою чергу, підвищує продуктивність та надійність роботи.

4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження ЧР асинхронного електроприводу ВУ

Здійснення регулювання продуктивності ВУ, частіше, здійснюється механічними засобами з використанням дросельної заслінки чи направляючого апарату. Застосування ПЧ дозволяє регулювати продуктивність при повністю відкритих заслінках, застосовуючи тільки зміну частоти обертання АД вентилятора. Це надає можливість: отримати економічний режим споживання електроенергії; плавний пуск електродвигуна ВУ до заданої швидкості, що дозволяє уникнути динамічних та пневматичних ударів у вентиляційній системі; збільшення інтервалів міжремонтних циклів та надійності електричного комутаційного обладнання; виконувати автоматичне регулювання продуктивності ВУ.

Залежність споживаної потужності для двигуна вентилятора від продуктивності при двох способах регулювання (у в.о.) надано на рис.4.2.

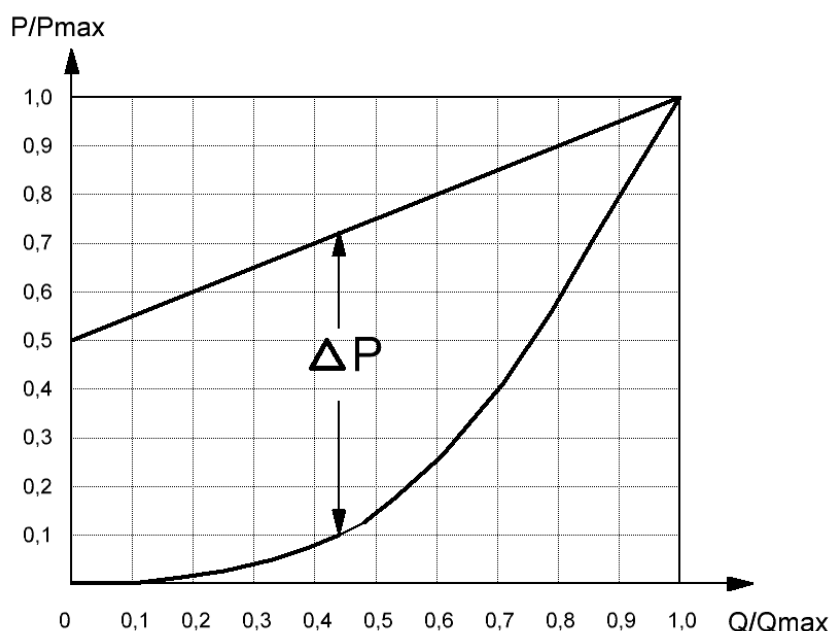


Рисунок 4.2 - Залежність споживаної потужності ВУ від продуктивності.

Відрізок ΔP визначає різницю в значеннях споживаних потужностей при механічному регулюванні (крива 1) та зміною швидкості обертання двигуна вентилятора (крива 2).

Для відцентрового вентилятору підготовчого цеху положення механічних апаратів 40^0 (у разі повного закриття 90^0). Існуючий робочий діапазон відцентрового вентилятора $Q/Q_{\max} = 0,6 - 0,7$.

- для дроселювання (що відповідає кривій 1):

$$P/P_{\max} = 0,8 - 0,85;$$

- для частотного регулювання (що відповідає кривій 2) :

$$P/P_{\max} = 0,22 - 0,35.$$

На рисунку 4.1: ΔP - різниця значень споживаних потужностей для двох способів регулювання продуктивності ВУ.

$$\text{Отже, } \Delta P = (0,8-0,85) - (0,22-0,35) = 0,58 - 0,5 ;$$

Розрахунок виконуємо для двигуна потужністю $P_{\max} = 30$ кВт; кількість годин роботи за рік $T = 4800$ год., вартість електроенергії приймаємо $C_0 = 6,56$ грн/кВт·год.

Різниця у значеннях споживаної потужності для двох способів регулювання продуктивності відцентрового вентилятора $\Delta P = 0,58 - 0,5$.

Річна економія електроенергії E складає:

$$E = P_{\max} \cdot \Delta P \cdot T \cdot C_0 = 30 \cdot (0,58 - 0,5) \cdot 4800 \cdot 6,56 = 547891,2 - 472320 \text{ грн.}$$

При проведенні аналізу технологічного режиму електроприводу і введенні систем автоматичного керування завданням швидкості, надійність роботи ВУ та економічний ефект можуть бути збільшені.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Організація проведення ремонтних робіт в електроустановках

Організаційні заходи з безпечної експлуатації електроустановок включають: оперативне обслуговування існуючих електроустановок, яке складається з періодичних та позачергових оглядів системи електропостачання і струмоприймачів; контроль за засобами обліку електроенергії; оперативні перемикання в електричних мережах, для забезпечення безперебійного електроживлення електроприймачів.

Оперативне обслуговування електроустановок здійснюється інженерно-технічним, черговим електротехнічним та оперативно-ремонтним персоналом.

Обов'язки закріпленого за даною електроустановкою чергового оперативного персоналу визначаються посадовими та місцевими інструкціями, у яких необхідно викласти основні заходи по електробезпеці і пожежній безпеці, які стосуються експлуатуємого електрообладнання.

Оперативне обслуговування електроустановок здійснюється особами, призначеними розпорядженням по підприємству. Чисельність оперативно - ремонтного персоналу для кожного цеху, ділянки, підстанції визначається особою, відповідальною за електрогосподарство (головним енергетиком підприємства).

Для обслуговування електроустановок напругою вище 1000 В керівник робіт по зміні (бригадир) або черговий повинен мати кваліфікаційну групу з охорони праці не нижче IV, в електроустановках до 1000 В – не нижче групи III.

Організаційними заходами із забезпечення безпечного виконання робіт в електроустановках є:

- оформлення роботи нарядом (розпорядженням), допуск працівників до роботи, нагляд за працівниками під час роботи, оформлення у наряді перерв в

роботі а також переходу членів бригади на інше робоче місце, оформлення закінчення робіт.

За нарядом оформлюються роботи, що проводяться з повним або частковим зняттям напруги з тієї електроустановки, що ремонтується, а також на роботи, що виконуються безпосередньо на струмоведучих частинах або поблизу них без зняття напруги. Ці роботи вимагають, як правило, підготовки робочого місця та здійснення технічних заходів щодо забезпечення безпечного їх виконання.

Організаційними заходами із забезпечення безпеки робіт, які проводяться в порядку поточної експлуатації, є:

- складання переліку таких робіт особою, відповідальною за електрогосподарство, який затверджує головний інженер підприємства (з урахуванням умов конкретного виробництва);
- визначення необхідності і можливості безпечного виконання тієї чи іншої роботи безпосереднім виконавцем робіт.

Такі роботи не потребують оформлення будь-яких додаткових розпоряджень і вважаються постійно дозволеними.

5.2 Технічні заходи з організації безпечної експлуатації електроустановок

При обслуговуванні електроустановок підприємства застосовуються наступні технічні захисні міри:

1. Малі напруги.

У разі, якщо номінальна напруга електроустановки не перевищує тривало допустимого рівня напруги дотику, навіть одночасний дотик працівника з струмоведучими частинами різних фаз електрообладнання (чи полюсів) буде безпечним. Однофазний дотик до перебуваючих під напругою струмоведучих частин, а також, дотик до металевого корпусу, який випадково опинився під напругою, та не заземлений, буде безпечним, тому що струм через людину під

час дотику до фази залежить від опору ізоляції та значення напруги. Однак у сирих приміщеннях, у яких опір людини буде значно знижений, струм, що протікає через тіло людини, при одночасному дотику до двох виводів або фаз буде невідпускаючим. В такому разі приймаються інші міри захисту.

2. Електричний розділ мереж.

Розгалужена електрична мережа великої довжини має, як правило, значну ємність і малий опір ізоляції відносно землі, тому, струм замикання на землю у такій мережі буває значним. Відповідно, однофазний дотик навіть в мережі з ізолюваною нейтраллю буде, безумовно, небезпечним. Якщо цілісну сильно розгалужену мережу, що має велику ємність і малим опір ізоляції розподілити на декілька невеликих мереж такої ж напруги, кожна з яких будуть мати незначну ємність та високий опір ізоляції, рівень небезпеки різко знизиться. Таким чином, струм через працівника, що доторкнувся до однієї фази визначається високим опором фазного проводу відносно землі, якщо у електромережах напругою 380 В $|Z| > 63$ кОм., а опір тіла людини $R_{ch} = 1,0$ кОм., струм через тіло працівника не перевищить 10 мА.

Як правило, електричне розділення мереж здійснюється шляхом під'єднання електроприймачів через розділювальні трансформатори, що заживлені від основної мережі.

Найбільшу небезпеку представляє також можливість продовження роботи електроустановки при глухому замкненні на землю, так як працівник, що доторкнувся до працюючої фази, потрапляє під лінійну напругу. Для уникнення небезпеки необхідно постійно проводити моніторинг контролю ізоляції.

3. Контроль та профілактика ушкоджень ізоляції.

Приймально-здавальні випробування проводяться під час вводу в експлуатацію нових та реконструйованих електроустановок. Обсяг і норми приймально-здавальних випробувань регламентуються правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС) та правилами улаштування електроустановок (ПУЕ).

Періодичний контроль ізоляції – проведення вимірювання опору ізоляції при прийманні електроустановки після монтажу, та періодично в терміни, що встановлюються правилами, або у випадку виявлення в процесі експлуатації дефектів. Вимірювання повинно здійснюватися на вимкненій установці. Вимірюється опір ізоляції по кожній фазі на кожній ділянці між двома послідовно розташованими апаратами захисту або за останнім захисним апаратом.

Для отримання інформації щодо опору ізоляції всієї мережі необхідно впроваджувати заміри під робочою напругою. Проведення такого контролю можливо виключно у мережах з ізольованою нейтраллю.

4. Захист від випадкового дотику.

Для виключення можливості дотику і наближення до струмоведучих частин на відстань, що несе небезпеку для працівників, застосовуються огороження, розташування струмоведучих частин обладнання на недоступній висоті, електричне блокування при відкриванні дверцят та інше. Огороження застосовуються як з цільних матеріалів так і сітчасті. Електричні блокування реалізовані на кінцевих вимикачах або на герконах. З метою захисту від дотику до частин, які нормально чи випадково можуть опинилися під напругою, застосовується подвійна ізоляція – електрична ізоляція, яка складається із робочої і додаткової. Призначення додаткової ізоляції – забезпечити додатково до робочої ізоляції захист працівника від ураження електричним струмом. Найбільш часто вона забезпечується покриттям ручок та інших доступних місць корпусів електрообладнання додатковим шаром електроізоляційного матеріалу, улаштуванням ізолюючих рукояток.

5. Захисне заземлення.

Захисне заземлення виконується для захисту людини від дії електричного струму, у разі дотику до металевих поверхонь, що виявились під напругою.

Конструктивними елементами захисного заземлення являються заземлювачі та заземлювальні провідники. У якості заземлювачів можуть бути

використані металеві провідники, які знаходяться у землі, заземлювальні провідники виконують з'єднання обладнання, яке заземлюється із заземлювачем.

6. Занулення.

Занулення представляє собою електричне з'єднання, що виконується з нульовим провідником металевих струмопровідних (але не струмовідних частин), що можуть опинитися під напругою. Воно виконується з метою унебезпечити людину від ураження електричним струмом, у випадку пробією на корпус однієї фази мережі електричного струму. Застосовується в 4-х провідних мережах до 1000 В з заземленою нейтраллю. Для зменшення тривалості режиму та часу замикання на корпус нульовий провід з'єднується з заземленою нейтраллю джерела а також з повторними заземлювачами. Занулення перетворює замикання на корпус струмоприймача в однофазне коротке замикання, спрацьовує максимальний струмовий захист і селективно відмикає ділянку мережі, на якій виникло замкнення.

7. Застосування пристроїв захисного відключення.

Захисне відключення – забезпечує швидке автоматичне відключення електроустановки у разі виникнення небезпеки ураження людини струмом. Виникнення небезпеки може статися як під час замкнення фази на корпус, так і при зниженні опору ізоляції електромережі нижче нормованої межі у випадку безпосереднього дотику працівника до струмоведучої частини, яка знаходиться під напругою.

Таким чином, якщо при дотику працівника до корпусу електрообладнання або до фази електромережі напруга дотику (або струм через людину) буде вище тривало допустимого значення, виникає безпосередня загроза ураження людини електричним струмом, а найбільш дієвим захистом в цьому випадку буде лише швидкий розрив ланцюга електричного струму через людину, тобто швидке відключення відповідної ділянки мережі.

Напруга дотику U_{dot} , В, обчислюється за формулою:

$$U_{\text{dot}} = I_h \cdot R_h,$$

де I_h - значення струму, що проходить через людину, А;

R_h – опір тіла людини, Ом.

Пристрій захисного відключення (ПЗВ) або диференціальний вимикач навантаження - це пристрій, призначений для захисту людини від випадкового дотику до оголених струмоведучих частин електричної мережі, а також від пожеж у разі виникнення короткого замикання.

Класифікація ПЗВ за типами залежить від характеру навантаження мережі, яка захищається. Існують наступні типи: АС, А, В, S, G:

- Тип АС гарантовано спрацює тільки внаслідок витoku , що повільно зростає або який виник моментально. Якщо виток відбувся після вузла випрямляча, або тиристорного регулятора і т.д який видає є пульсуючий (випрямлений) або постійний струм, то ПЗВ може не спрацювати;
- Тип А, на відміну від АС, спрацьовує на змінний синусоїдальний або постійний пульсуючий диференціальний струм, який виникає моментально або наростає поступово;
- Тип В реагує на виникненні змінного або постійного випрямленого диференційного струму;
- Тип S, спрацьовує як і ПЗВ типу АС, але має затримку на відключення 0,13 – 0,5 с;
- Тип G, спрацьовує швидше, ніж S, але повільніше за ПЗВ типу АС.

По конструкції ПЗВ бувають:

- електромеханічні (які не залежать від напруги живлення);
- електронні (що залежать від напруги живлення) - щоб електронне ПЗВ спрацювало, необхідне додаткове живлення. У разі, якщо на лінії перед ПЗВ зникає робочий нуль, а фаза залишається присутня, то при торканні людини до не заземленого корпусу, або фази електронне ПЗВ не відключиться, в такому випадку спрацює тільки електромеханічне.

Конструктивно ПЗВ складається з окремих елементів (рис.5.1), що реагують на вхідну величину, її зміни і при заданому значенні цієї величини дають сигнал на відключення автоматичного вимикача.

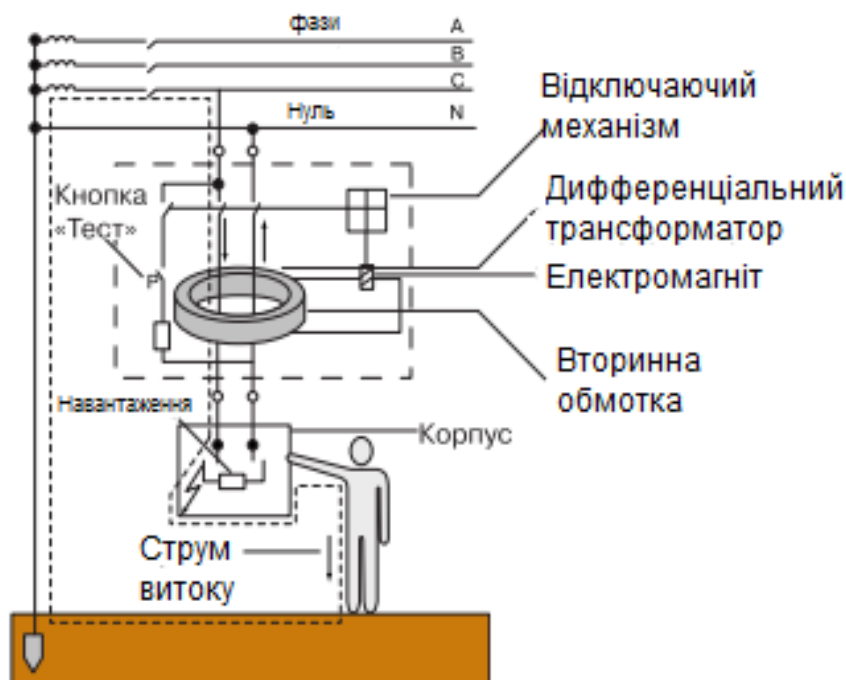


Рисунок 5.1 – Пояснення конструктивного виконання ПЗВ.

Цими елементами є:

- 1) Основним елементом ПЗВ є диференційний трансформатор, що відстежує різницю вхідного та вихідного струмів, що проходить через прилад.
- 2) підсилювач, призначений для посилення сигналу, якщо він виявляється недостатньо потужним;
- 3) пусковий (пороговий) елемент (реалізується, як правило, на чутливих магнітоелектричних реле прямої дії або електронних компонентах);
- 4) ланцюги контролю, що призначені для періодичної перевірки справності ПЗВ;
- 5) виконавчий механізм (силова контактна група та механізм приводу).

Основні вимоги, яким повинні відповідати ПЗВ:

- висока чутливість;
- малий час відключення;
- селективність дії;
- здатність до самоконтролю справності;
- висока надійність.

Чутливість ПЗВ – здатність пристрою реагувати на малі зміни вхідної величини (безпосередньо впливає на рівень безпеки).

Пристрої, які дозволяють з більшою чутливістю задавати уставку, що забезпечує вищу безпеку дотику до фази, відповідно дорожчі та складніші.

Час відключення – період від моменту виникнення аварійної ситуації до моменту розриву ланцюга струму комутаційним апаратом, що дорівнює сумі часу дії захисту t_z , с, та часу спрацювання комутаційного апарата, t_e , с:

$$t_{\text{відкл}} = t_z + t_e.$$

Ті різновидності приладів і апаратів, що застосовуються у схемах захисного відключення, як правило, забезпечують час відключення $t_{\text{відкл}} = 0,05-0,2$ с.

5.3 Розрахунок заземлення

Згідно вимог ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання із струмопровідними частинами, але можуть опинитись під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, повинні бути заземлені.

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів мають схему Δ/Y з нулем. Приймаємо, що величина струму замикання на землю складає 27 А. Цехова підстанція 10/0,4 кВ отримує живлення від 2-х кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Грунт, у якому прокладені кабелі – чорнозем, другий кліматичний район.

Виконуємо розрахунок заземлення цехового обладнання, який полягає у визначенні кількості вертикальних заземлювачів а також у розрахунку довжини з'єднувальної полоси між електродами, та розміщенням схеми заземлення на плані.

Визначаємо нормований опір заземлення R_z^H .

У разі, якщо заземлюючий пристрій одночасно застосовується для електроустановок напругою до 1000 В і вище:

$$R_z \leq \frac{125}{I_z} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом};$$

Згідно п.1.7.92 ПУЕ, опір заземлювального пристрою R_z для електроустановок з джерелом трифазного струму, з лінійною напругою 380 В повинен бути не більше 4 Ом. Приймаємо $R_z = 4 \text{ Ом}$.

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{табл} \cdot \psi = 220 \cdot 1,3 = 286 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

де значення $\rho_{табл}$ – табличне, для чорнозему відповідає $\rho_{табл} = 220 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

ψ – підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів складає $\psi = 1,2 \sim 1,4$.

Вираховуємо опір одинарного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \cdot \frac{\rho_{розр}}{l} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot t + l}{4t - l} \right) = \\ &= 0,366 \cdot \frac{286}{5} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 15,4 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

l – довжина заземлювача, приймаємо величину 5 м; d – діаметр заземлювача (приймаємо стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м};$$

де h – глибина укладки полоси (згідно ПУЕ – 0,5~0,8 м).

Для найбільш ефективного використання розташовуємо електроди по замкнутому контуру, розміщуємо на плані та вираховуємо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_e}{R_3^H \cdot \eta_o} = \frac{15,4}{4,054} = 6,9 \approx 7 \text{ шт.},$$

де η_o – коефіцієнт використання групи заземлювачів, для $a/l=4/5=0,8$,

$\eta_o=0,54$, $a = 4$ м – відстань між електродами.

Довжина горизонтального заземлювача (з'єднувальної полоси):

$$l_n = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 7 = 29,4 \text{ м.}$$

Опір полоси з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \cdot \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} \cdot \lg \frac{2 \cdot l_n}{b \cdot n} = 0,366 \cdot \frac{286}{29,4 \cdot 0,51} \cdot \lg \frac{2 \cdot 29,5^2}{0,01 \cdot 7} = 28,38 \text{ Ом};$$

де η_n – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача - з'єднувальної полоси перерізом 50 мм² (шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм).

Розрахунковий опір вертикальних заземлювачів, виходячи з величини опору з'єднувальної полоси:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_3^H}{R_n \cdot R_3^H - 4} = \frac{28,38 \cdot 4}{28,38 - 4} = 7,94 \text{ Ом.}$$

Визначаємо кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{15,4}{7,94 \cdot 0,59} = 3,6 \approx 4 \text{ штук.}$$

Перевіряємо опір заземлювача і порівнюємо отримане значення з допустимим:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{7,94} + \frac{1}{28,38}} = 3,78 \text{ Ом.}$$

$$3,78 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом.}$$

Схема розташування захисного заземлення наведена на рисунку 5.2.

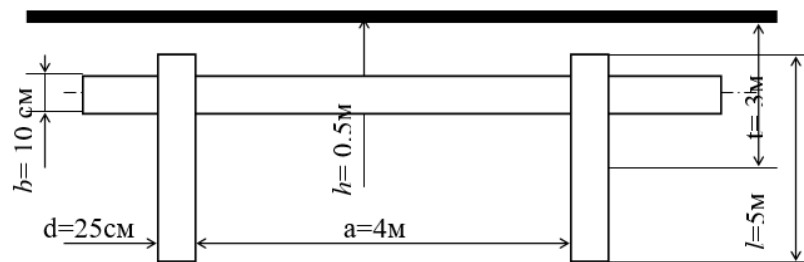


Рисунок 5.2- Схема прокладки заземлення.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто підвищення енергоощадності асинхронних електроприводів, на прикладі олійноекстракційного виробництва.

Для аналізу найбільш поширених технологічних механізмів ОЕВ, побудовані баланси споживання електроенергії для підготовчого цеху та встановлено найбільш енергоємні споживачі. До таких груп механізмів належать конвеєри, вентилятори, насоси, що мають асинхронний електропривод.

Далі, в роботі розглянуті основні напрямки підвищення ефективності використання асинхронного електроприводу, та зроблено висновок, що для прийнятої групи споживачів ОЕВ, найбільш ефективним являється використання регульованого електроприводу.

Виконано аналіз регульованих електроприводів: тиристорних перетворювачів напруги та напівпровідникових перетворювачів частоти.

Для електроприводів конвеєрів запропоновано встановлення пристроїв плавного пуску, що дозволяють зменшити втрати електроенергії при плавному пуску двигуна, усунути значні механічні моменти і струми, що пов'язані з прямим запуском двигунів від мережі, зменшити електродинамічні зусилля на саму конвеєрну установку. Приведені схеми низьковольтного пристрою плавного пуску, та вибрано тип пристрою серії RSR (фірма ABB). Для двигуна транспортера потужністю 7,5 кВт визначена річна економія електроенергії за рахунок проведення плавного пуску, що склала 405 грн. Надані рекомендації по виконанню налаштування ППП.

Для насосних та вентиляторних установок розглянуто використання частотнорегульованого електроприводу. До переваг застосування частотного регулювання електроприводу насосів слід віднести: заощадження електроенергії, можливість підтримання постійного напору при зміні продуктивності насосної установки, підвищення надійності електричного та механічного устаткування, збільшення його терміну служби.

Для відцентрового моноблочного насосу марки NKM-G 80-250/270/11/4, з потужністю електродвигуна 11,0 кВт, виконано оцінку зменшення споживання електроенергії. Розрахунки показали, що річна економія електроенергії склала 293,98 тис.грн. Вибрано тип і марку перетворювача частоти: ACQ580-01-026A-4+B056, схему підключення перетворювача частоти.

Розглянуто переваги використання регульованого електроприводу для вентиляторних установок. Побудовані характеристики ВУ при різних способах регулювання продуктивності установки. Показано, що найбільш економічним являється регулювання продуктивності зміною швидкості обертання асинхронного двигуна.

Для визначення параметрів режиму роботи ВУ на основі ЧР асинхронного електропривода застосовано метод комп'ютерного імітаційного моделювання. Для реалізації цього методу, розроблена узагальнена структурна схему автоматичного керування режимом роботи ВУ, здійснено розробку комп'ютерних імітаційних моделей її окремих елементів. Моделювання виконано у програмному комплексі Matlab.

Проведені техніко-економічні розрахунки, які дозволили оцінити ефективність використання регульованих електроприводів на виробництві. Так, для НУ з частотнорегульованим електроприводом, отримано річну економію експлуатаційних витрат у розмірі 308 тис. грн., для ВУ річна економія електроенергії склала 500 тис.грн.

Впровадження регульованого електроприводу для технологічного обладнання промислового виробництва, забезпечує оптимальні режими роботи механізмів з точки зору заощадження електроенергії та дозволяє підвищити надійність та термін експлуатації обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О.І. Соловей, В.П. Розен, П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, В.Ф. Ткаченко, К.Г. Петрова]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
2. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник.-К:Кондор, . - 408 с.2005
3. Правила улаштування електроустановок., видання третє, перероблене і доповнене. Мінпаливенерго 2010 р. -736 с.
4. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів / Державний нормативний акт про охорону праці, Київ 1998.
5. Демов О. Д. Економія електроенергії на промислових підприємствах. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 95с.
6. Енергоефективні системи освітлення для промислових та комунально-побутових споживачів / [Плешков П. Г., Орлович А. Ю., Серебренніков С. В., Бегун А. П., Різуненко А. О., Гарасьова Н. Ю., Зінзура В. В.] ;– Харків: ТОВ «Цифра Принт», 2018.– 242с. Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/12775>
7. Плешков П.Г., Орлович А.Ю., Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування.- Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2007.
8. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В.В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А.І., Величко Т.В., Плешков С.П.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т.- Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2021.-209 с.
9. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В. Навчальний посібник. Видавець Лисенко В.Ф., м.Кропивницький, 2020р. – 272 с.

10. Patriot-nrg Міжнародний портал з енергозбереження [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://patriot-nrg.com/content/ekonomiya-elektroenergiyi-v-osvitlyuvalnyh-ustanovkah>
11. Artenergy.com.ua [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.artenergy.com.ua/novosti/karta-solnechnoi-insoliatsii-ukrainy>
12. Безпека праці та промислова санітарія. Навчальний посібник до курсу «Охорони праці»: [К.Н. Ткачук та ін.] – Тернопіль.: 2018. – 213 с.
13. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/29590_20.html
14. Лідньов А.О. Інструкція з охорони праці для електромонтера з ремонту і обслуговування електроустаткування. – Київ.: 2018 – 13 ст.
15. Офіційний сайт Schneider Electric [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.schneider-electric.com>.
16. Офіційний сайт Siemens [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.siemens.com>.
17. Разумний Ю.Т. Ефективне використання електроенергії та палива: Навчальний посібник / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов, В.М. Прокуда, Н.Ю. Рухлова; м-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д: [НГУ], 2014. – 223 с. 117.
18. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001. – 410 с.
19. Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт і самостійної роботи з навчальної дисципліни «Методи та засоби енергозбереження в електротехнічних комплексах» для аспірантів очної форми навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» третього (освітньо-наукового) рівня / [уклад. В.О.Огарь, Ю.О.Алексєєва]. – Кременчук, 2019.- 65 с.
20. Яцун М.А. Електричні машини: Навч. посібник- Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004.-440с.
21. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

22. Ловейкін В.С. Частотне керування асинхронним приводом / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – Ніжин.: Міланік, 2011. – 98 с.
23. Найефективніший мотор у світі [Електронний ресурс].–Режим доступу: <https://uk.sogears.com/>
24. Надвисокоєфективний двигун серії KE3 [Електронний ресурс].–Режим доступу: https://www.kg-electric.com/ELECTRIC_MOTORS.html
25. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с. – Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>
26. Energy-Efficient Electric Motors and their Applications John T., 1994
27. Energy-Efficient Electric Motors, Revised and Expanded. Ali Emadi., 2018
28. Energy-saving principles and technologies for induction motors. Wtnzhong Ma and Lianping Bai Wiley: 2018
29. Пристрої плавного пуску. Переваги використання. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4344.php>
30. Продукція фірми АВВ. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://voltline.ua/about/>
31. ATV600_catalog_2021_en PDF. [Електронний ресурс].– Режим доступу: www.electrocentr.com.ua
32. nkm-g-nkr-g. [Електронний ресурс].– Режим доступу: www.promnasos.com.ua
33. Верба В.А, Загородніх О.А. Проектний аналіз: Підручник. Київ: КНЕУ, 2000. - 332с.