

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2022р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему
“Техніко-економічна оцінка енергетичної
ефективності використання тиристорних
перетворювачів електроприводів для енергоємних
процесів
Technical and economic evaluation of the energy efficiency
of the use of thyristor converters of electric drives for
energy-intensive processes”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-21М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Андрій БРОВЧЕНКО
« ____ » _____2022 р.
Керівник роботи
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____2022р.
Рецензент _____

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Плешков П.Г.

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Бровченка Андрія Андрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Техніко-економічна оцінка енергетичної ефективності використання тиристорних перетворювачів електроприводів для енергоємних процесів**

2. Керівник роботи (проекту) Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 5.12.2022 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____
Перспективні напрямки поліпшення енергетичної ефективності для комунальної сфери на основі тиристорних перетворювачів електроприводів; Порівняльна характеристика доцільності впровадження тиристорних перетворювачів для підвищення енергетичної ефективності; Математичне моделювання режимів тиристорних перетворювачів електроприводу у технологічних процесах комунальної сфери; Вибір систем тиристорних перетворювачів електроприводів для енергоємних процесів комунальної сфери; Техніко-економічна оцінка енергоефективної технології тиристорних перетворювачів електроприводів для комунальної сфери; Охорона праці

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Перспективні напрямки поліпшення енергетичної ефективності для комунальної сфери на основі тиристорних перетворювачів електроприводів</i>	7.10.22	
2	<i>Порівняльна характеристика доцільності впровадження тиристорних перетворювачів для підвищення енергетичної ефективності</i>	15.10.22	
3	<i>Математичне моделювання режимів тиристорних перетворювачів електроприводу у технологічних процесах комунальної сфери</i>	22.10.22	
4	<i>Вибір систем тиристорних перетворювачів електроприводів для енергоємних процесів комунальної сфери</i>	4.11.22	
5	<i>Техніко-економічна оцінка енергоефективної технології тиристорних перетворювачів електроприводів для комунальної сфери</i>	11.11.22	
6	<i>Охорона праці</i>	19.11.22	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	26.11.22	
8	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	5.12.22	

Дата видачі завдання _____
Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2022р.

Завдання прийнято до виконання _____
Підпис студента _____

« ____ » _____ 2022 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 170 с., 83 рис., 24 табл.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження енергетичної ефективності використання тиристорних перетворювачів для приводів комунальної сфери з розробкою заходів по підвищенню енергоефективності електроприводі.

При проектуванні системи електропостачання необхідно забезпечити раціональне використання електроенергії. Велика увага при розробці проекту приділяється питанням надійності та економічності системи електропостачання, безпеці та зручності експлуатації. Система електропостачання повина забезпечити потрібну якість електроенергії на затискачах споживачів, можливість розширення при розвитку підприємства без значного ускладнення та подорожчення першопочаткового варіанта.

Суттєвим фактором підвищення енергоефективності системи електропостачання є застосування енергозберігаючих заходів в асинхронному електроприводі.

В роботі проведені загальні дослідження систем нерегульованого та регульованого електроприводів, приділена увага дослідженням режимів енергозбереження в електроприводах з тиристорними перетворювачами.

Розглянуто впровадження заходів з електрозбереження в асинхронному електроприводі. Виконана оцінка економічного ефекту та розрахунок терміну окупності установки.

ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, РЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СТРУКТУРА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ABSTRACT

Qualification work: 170 p.; 83 fig., 24 table.

The purpose of the qualification work is to study the energy efficiency of the use of thyristor converters for drives in the utility sector with the development of measures to increase the energy efficiency of the electric drive.

When designing the power supply system, it is necessary to ensure the rational use of electricity. During the development of the project, great attention is paid to the issues of reliability and economy of the power supply system, safety and ease of operation. The power supply system must ensure the required quality of electricity at consumers' terminals, the possibility of expansion during the development of the enterprise without significant complication and increase in the price of the original version.

A significant factor in increasing the energy efficiency of the power supply system is the use of energy-saving measures in the asynchronous electric drive.

In the work, general studies of the systems of unregulated and regulated electric drives are carried out, attention is paid to the study of energy saving modes in electric drives with thyristor converters.

The implementation of electricity saving measures in an asynchronous electric drive is considered. The assessment of the economic effect and the calculation of the payback period of the installation were carried out.

ELECTRICAL LOADS, THYRISTOR FREQUENCY CONVERTER, ADJUSTABLE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, STRUCTURE OF ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, MATHEMATICAL MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTOR AND CONVERTER, ENERGY EFFICIENCY

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
ГЛАВА 1. ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ПОЛІПШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ НА ОСНОВІ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	9
1.1 Проблеми енергетичної ефективності комунальної сфери в Україні.....	9
1.2 Перспективи використання тиристорних перетворювачів електроприводів для комунальної сфери.....	14
1.3 Досвід використання тиристорних перетворювачів для комунальної сфери.....	22
ГЛАВА 2. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	28
2.1 Електроприводи ліфтів.....	32
2.2 Електроприводи відцентрових насосів.....	37
2.3 Електроприводи вентиляторів і турбокомпресорів.....	49
2.4 Електроприводи поршневих машин.....	58
2.5 Електроприводи конвеєрів і транспортерів.....	61
2.6 Енергетичні характеристики системи НПЧ-АД.....	65
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ.....	78
3.1 Математичний опис елементів силової частини ТПЧ-АД.....	78
3.2 Дослідження роботи системи регульованого електроприводу насосної станції за допомогою математичної моделі.....	86
3.2.1 Математичний опис системи.....	88
3.2.2 Режими роботи насосної станції без перетворювача частоти.....	98

3.2.3	Режими роботи насосної станції з частотним перетворювачем...	100
3.3	Перехідні процеси системи управління пасажирським ліфтом за допомогою математичної моделі.....	104
3.3.1	Розробка математичної моделі технологічного процесу управління та технологічного обладнання з тиристорними перетворювачами електроприводів.....	104
3.3.2	Структура і параметричний синтез регуляторів системи управління.....	113
ГЛАВА 4. ВИБІР СИСТЕМ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ДЛЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ПРОЦЕСІВ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ.....		121
4.1	Системи водопостачання.....	121
4.2	Системи тепlopостачання.....	133
4.3	Електроприводи ліфтів.....	144
ВИСНОВКИ.....		150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		152
ДОДАТОК А. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ДЛЯ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ.....		154
A.1	Оцінка економічної ефективності впровадження регульованого асинхронного електропривода насосної станції.....	154
A.2	Оцінка економічної ефективності впровадження тиристорного перетворювача електропривода насосу.....	158
A.3	Розрахунок економічної ефективності впровадження тиристорних перетворювачів.....	161
ДОДАТОК Б. ОХОРОНА ПРАЦІ		163

ВСТУП

Поняття енергозбереження вмістовує величезний потенціал економії енергетичних і природних ресурсів таких як газ, електроенергія, тепло та вода. Для комунальних підприємств в Україні енергозбереження – це надійний, хоча й не простий шлях заробляти реальні кошти. Повторне вкладання цих зароблених комунальними підприємствами коштів в нові проекти з енергозбереження дає можливість безперервно підвищувати якість наданих послуг, і навіть знижувати тарифи. Найголовніше - все це сьогодні доступне для впровадження на комунальних підприємствах тепло-, водопостачання і водовідведення в Україні. Цей висновок виникає, після ознайомлення з досвідом вирішення аналогічних завдань у країнах далекого та близького зарубіжжя.

Основне положення в енергозбереженні: яким чином забезпечувати наявний рівень послуг з меншими енергетичними витратами. Традиційний підхід до енергозбереження розглядає тільки технічну сторону цього процесу, тобто вкладання грошей в технічне переозброєння виробництва, без зобов'язань повернути кошти тому, хто їх надає для подальшого вкладання в нові проекти. Частіше таким вкладником є державний та місцеві бюджети України, також електроенергетична галузь через занижені тарифи, пільги та перехресні субсидії.

У той же час енергозбереження – це в першу чергу фінансовий фактор, тобто бізнес, для успішної реалізації якого потрібні специфічні фінансові важелі. Ці важелі не потрібно розроблювати заново, вони вже створені багато років тому, та з успіхом реалізуються в умовах ринкової економіки та приносять чималі прибутки. Це не разові дії чи компанії, це - постійний, сталий бізнес, що повинен працювати на безперервній основі та забезпечувати стійкий зростаючий прибуток сьогодні та в подальшому. Це - бізнес, що потрібний комунальним підприємствам сьогодні і буде потрібний завтра, оскільки енергетичні характеристики нового устаткування і

технологій безперервно поліпшуються, а вже встановлене устаткування має тенденцію старіти і погіршувати свої параметри.

Енергозбереження - це непрості заходи. Місто і муніципальні підприємства сьогодні повинні працювати разом, як єдиний злагоджений механізм, щоб зробити ці заходи успішним за рахунок спільного фінансування проектів).

Енергозбереження – це найбільш ефективний шлях щодо зниження собівартості комунальних послуг в Україні.

Україні варто вивчити досвід економічно розвинутих країн, насамперед - досвід найближчих західноєвропейських країн, аби запровадити аналогічні перетворення в себе, враховуючі помилки інших.

Реалії нового господарчого життя підтверджують, що в комунальній галузі, так же як і в другій іншій, існують такі прописні істини, про які раніше найчастіше забували, або на які не звертали відповідної уваги:

- Тепло та питна вода в домівках - це ринковий товар, їх необхідно купувати та продавати;
- Енергоносії та питна вода, як і будь-який товар, мають свою ціну, яка повинна покривати витрати виробника та постачальника, але не повинна давати їм можливості здобуття надмірних та необґрунтованих зисків;
- Тепло та вода надаються споживачеві в якості енергетичних послуг;
- Марнотратність веде до зубожіння комунальної галузі;
- Зменшення витрат енергії та/або зменшення вартості послуги вимагає капіталовкладень, на які звичайно бракує грошей.

Практика більшості держав доводить, що перші 20% заощадженої енергії отримуються тільки завдяки упорядкуванню енергетичного господарства та наведення елементарного порядку.

В той час як надання комунальних послуг вимагає значних енерговитрат, багато підприємств комунального господарства неспроможні платити за спожити ними газ та електроенергію.

Розв'язати цю проблему дуже непросто, особливо з огляду на те, що тарифи на газ та електроенергію, як правило, зростають швидше, ніж тарифи на тепло та воду, що ще більше підриває платоспроможність підприємств.

Однією з складових підвищення економічної ефективності системи електропостачання є застосування тиристорних перетворювачів електроприводу.

В кваліфікаційній роботі будемо проводити аналіз ефективності використання тиристорних перетворювачів в електроприводах об'єктів комунальної сфери.

ГЛАВА 1. ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ПОЛІПШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ НА ОСНОВІ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1.1. Проблеми енергетичної ефективності комунальної сфери в Україні.

Житлово-комунальна сфера посідає в Україні третю сходинку після металургійної та хімічної промисловості по обсягам споживання енергоносіїв та перше місце - по споживанню тепла. Так, у період з 2012 по 2022 рік, щорічне споживання природного газу підприємствами житлово-комунального господарства України складало 9,6-12,3 млрд. м³, а електроенергії – близько 10 млрд. кВт-год, тобто, відповідно, 10-12% та і 5-6% від їх загальнодержавного споживання.

Вже декілька років ніхто ні в Україні, ні за її межами не заперечує той факт, що на найближчу перспективу одним з найголовніших завдань країни з енергетичної точки зору має стати підвищення енергоефективності та енергозбереження. Це дуже вигідно з економічної точки зору, тому що затрати на одну тонну умовного палива, яку отримано за рахунок енергозбереження, в кілька разів менші від затрат на видобуток чи купівлю палива. Реалізація потенціалу енергозбереження разом зі запровадженням у першу чергу маловитратних заходів може дозволити істотно зменшити витрати на енергоносії та вивільнити фінансові ресурси для здійснення сучасної енергоефективної системи технологій.

Житлово-комунальне господарство (ЖКГ) є основною життєзабезпечуючою галуззю, яка найбільш гостро реагує на зміни у ринкових відносинах.

До того ж у ЖКГ України останніми роками намітилась виразна тенденція: поряд із заходами щодо економії ресурсів і пошуку

можливих резервів зниження витрат відбувається збільшення втрат при споживанні тепла, газу, електроенергії, води.

Водночас концептуальні положення політики енергозбереження та раціонального використання ресурсів ЖКГ, як важливої складової економічної стратегії розвитку підприємств галузі в ринкових умовах, не отримали необхідного розвитку. Як наслідок існує об'єктивна необхідність комплексного розгляду цієї складної і важливої проблеми.

Відомо, що в Україні енерговитрати на обслуговування 1 кв. м житла в 3–7 разів більші ніж у країнах Західної Європи, а витрати електроенергії на постачання 1 куб. м води вищі на третину. Питома вага адміністративних видатків у собівартості житла складає близько 30%, більше половини видатків припадає на заробітну плату, при цьому ефективність праці нижче в 4–16 разів ніж у Західній Європі. Законодавче забезпечення енергозбереження є загальним, саме тому на теплопостачання житлового фонду України в середньому на людину в рік витрачається приблизно 5,6–5,7 т. умовного палива, що в 1,5–2,2 рази більше ніж в Данії, США та інших країнах. У зв'язку з низькими теплоізолюючими властивостями будинків втрати тепла досягають 30% загальних втрат теплоенергії. Аналіз світового досвіду ефективного функціонування ЖКГ на основі реалізації інноваційних енергозберігаючих заходів вказує на значні перспективи розвитку ЖКГ України у цьому напрямку.

Проблему регулювання енергозабезпечення суспільства розглядають ряд авторів, але всі вони відзначають наявність послідовної діяльності в цьому напрямку в США, Японії, Франції, Швеції та інших країнах. Так, у Німеччині прийнято закон «Про постачання електроенергії з відновлюваних джерел електромереж загального користування», згідно з яким незалежні виробники електроенергії від відновлювальних джерел енергії отримали право передавати її в загальні мережі, а в Греції законодавчо закріплені дотації в обсязі 45–55% вартості вторинної енергії. В Японії та США

передбачена адміністративна відповідальність керівників компаній за неефективне використання енергоносіїв.

Таким чином аналіз світового досвіду ефективного функціонування ЖКГ на основі реалізації інноваційних енергозберігаючих заходів вказує на значні перспективи розвитку ЖКГ України у цьому напрямку.

В економіці України комунальна сфера є однією з енергоємних, вона споживає понад 40% природного газу, а потенціал для економії у цій галузі майже 50%, тобто існування інвестиційного потенціалу в галузі не викликає заперечень. Проте залученню приватних інвестицій у комунальне господарство заважають стандартні законодавчі, нормативні та політичні умови. Існуючі раніше централізовані джерела фінансування заходів щодо енергозбереження в даний час ліквідовані, що робить неможливим упровадження енергозберігаючих технологій в ЖКГ не тільки зараз, але і в перспективі.

До загальновідомих джерел фінансування заходів спрямованих на підвищення енергоефективності ЖКГ слід віднести:

- побудова цільових фондів енергозбереження на промислових підприємствах за рахунок коштів, отриманих від впровадження інноваційних технологій та економії паливно-енергетичних ресурсів;
- залучення позикових коштів на довгостроковій основі та інвестицій приватного сектору з метою фінансування проектів енергозбереження (наприклад шляхом укладення договору концесії);
- створення у містах спеціалізованих комунальних позабанківських інноваційних фінансово-кредитних організацій, комунальних фондів кредитування інноваційної динаміки розвитку підприємств;
- залучення альтернативних джерел фінансування довгострокових інноваційних проектів шляхом випуску муніципальних облігацій, використання фінансового лізингу із залученням виробничого обладнання енергосервісних компаній;

- створення регіональних муніципальних позабюджетних фондів енергозбереження тощо .

Проблема полягає не тільки у відсутності коштів:

- Відсутні дієві організаційно-фінансові механізми залучення коштів до реалізації проектів та повернення фінансових ресурсів, що залучені. Більш того, в суспільстві домінує усвідомленість того, що запозичені гроші можливо не повертати;
- Керівники підприємств непевні в отриманні реальної віддачі від впровадження енергозберігаючих заходів (ЕЗЗ), а виконавці проектів непевні, що їх робота буде оплачена, тобто відсутня договірна база щодо взаємної відповідальності міста, комунальних підприємств та виконавців на усіх рівнях та етапах впровадження ЕЗЗ.

На сьогоднішній день перспективним напрямом залишається «самоінвестування». Реалізація механізму «самоінвестування» повинно здійснюватися шляхом ініціатив з боку держави, зокрема, на рівні регіональних органів місцевого самоврядування, з використанням системи ціноутворення на житлово-комунальні послуги, на основі соціально спрямованого бюджету всіх рівнів влади, поліпшення інвестиційного клімату і адміністративної політики . В основі механізму «самоінвестування» величина економії засобів від зниження споживання енергоресурсів, яка повинна бути розрахована для споживача енергії або для інвестора на основі енергоаудиту. Фінансування енергозберігаючих проектів необхідно здійснювати поетапно на основі реінвестування вилучених від економії коштів в подальший розвиток енергозбереження.

Що стосується програми енергозбереження, то пріоритетними напрямками є підвищення ефективності виробництва та споживання паливно-енергетичних ресурсів, ґрунтуючись на впровадженні апробованих та сертифікованих технологічних засобів та технологій у ЖКГ. Серед них - модернізація джерел тепла, покращення системи розподілу та транспортування електричної, теплової енергії, води, підвищення

ефективності використання енергетичних ресурсів у тепловій енергетиці та при виробітку питної води при їх використанні у житловому фонді.

Необхідно також зазначити, що енергозбереження регіонів, міст, районів є основою їх життєдіяльності. Втрати енергії в результаті відсутності систематичних енергозберігаючих заходів сьогодні є основним джерелом дефіциту бюджетів всіх рівнів. Ці втрати не можливо понизити без початкових витрат – це аксіома.

Економія від енергозбереження має розглядатися як джерело повернення можливих інвестицій у розвиток сектору ЖКГ, впровадження енергозберігаючих технологій, які мають за мету зниження споживання паливно-енергетичних ресурсів та створення системи обліку ресурсів, найбільш наближених до споживача та такої, що дозволяє чітко встановлювати обсяг споживання та рівень втрат впродовж всього технологічного ланцюга від виробника до споживача.

Що треба зробити для підвищення енергоефективності комунальних підприємств:

- Вдосконалити законодавчо-нормативну базу з енергозбереження;
- Запровадити прозору та економічно виправдану систему встановлення тарифів, що стимулює енергозбереження;
- Розробити механізми створення ресурсозберігаючих технологій з метою зниження вартості послуг;
- Впровадити на підприємствах систему енергетичного менеджменту;
- Розробити технічні, фінансові, юридичні та екологічні аспекти енергозберігаючих проектів з урахуванням пріоритетів підприємств;
- Вдосконалити технологічне оснащення й поліпшити показники роботи підприємств шляхом реалізації енергозберігаючих проектів;
- Пожвавити участь населення у впровадженні заходів з енергозбереження.

Впровадження енергозберігаючих заходів дозволяє:

- Покращити економічну ситуацію за рахунок направлення коштів на економічний розвиток, а не на оплату за енергоносії;

- Підвищити конкурентно-спроможність товарів за рахунок зниження частки енергоносіїв у собівартості;
- Знизити попит на енергоносії та уповільнити тим самим ріст цін на носії;
- Знизити дефіцит первинних енергоносіїв;
- Поліпшити соціальний стан у регіонах за рахунок зниження кількості вимкнень подачі електроенергії, більшого забезпечення населення теплом і водою;
- Поліпшити екологічний стан у регіоні.

Що ж потрібно робити, щоб забезпечити якість житлово-комунальних послуг на рівні світових стандартів не підвищуючи тарифи?

Варто звернутися до досвіду розвинутих країн, які, використовуючи енергозбереження в якості інструменту для зниження собівартості комунальних послуг, змогли позитивно і за короткий час вирішити цю проблему. Сьогодні вже є багато прикладів використання цього досвіду не тільки за кордоном, а й в Україні. І цей досвід підтверджує, що енергозбереження це складний але ж і найбільш ефективний шлях щодо зниження собівартості комунальних послуг.

1.2. Перспективи використання тиристорних перетворювачів електроприводів для комунальної сфери.

В існуючій економічній ситуації реалізацію економічно доцільних енергозберігаючих проектів можна розглядати в якості навряд чи не єдиного механізму запобігання загальної енергетичної кризи, що наближається. А сумарний енергозберігаючий потенціал проектів, що швидко окупаються, складає величину, достатню для рішення проблем комунальної енергетики. Одним з таких економічно доцільних енергозберігаючих проектів є використання частотно-регульованого електроприводу.

Частотне регулювання електропривода можливо рекомендувати для всіх механізмів, що працюють із приводом від двигунів змінного струму.

1. Комунальне і промислове водопостачання:

- надійне водопостачання холодної та гарячої води з можливістю керування від одного перетворювача до шести електронасосів;
- істотна економія газу в мережах теплопостачання житлових і виробничих будинків залежно від кліматичних умов.

2. Ліфтове й кранове господарство - істотна економія електроенергії, покращення якості (плавність розгону-гальмування) та точності функціонування механізмів.

3. Енергетика – регулювання надходження повітря в камеру спалювання палива в залежності від потрібного навантаження станції одночасно зі зменшенням шкідливих викидів в атмосферу та зниженням екологічного навантаження на навколишній простір. Точна хімічна автоматична підготовка води для проходження тепла від енергогенеруючих агрегатів з підвищенням ресурсу роботи магістралей охолодження та термінів між їхнім регламентним обслуговуванням.

4. Комунальна теплоенергетика.

На даний момент майже на всіх місцях міської інфраструктури (підприємства гарячого і холодного водопостачання, опалення, водоочищення і водовідведення міст, сільських районів у селищ (теплові мережа, водопровідно-каналізаційні господарства, водоканали і т.п)) використовуються асинхронні електричні двигуни. Вони мають велику перевагу перед електричними двигунами постійного струму за рахунок зручності обслуговування і простоти конструкції.

Які вигоди варто очікувати від застосування ЧРП:

- економія електричної енергії (30 - 60%);
- зниження пускових струмів двигуна;
- економія природних ресурсів, наприклад, води (до 25%);
- уникнення гідравлічних ударів у системі і як наслідок: мінімалізація витрат на обслуговування; продовження термінів роботи устаткування; зниження ймовірності аварійних ситуацій;

- економія тепла ($\approx 6\%$);
- економія палива (до 20%);
- спроможність точного налаштування режиму роботи технологічної системи;
- підвищення виробничої безпеки;
- екологічність.

Наведемо приклад однієї з типових насосних станцій водопостачання житлового району смт. Вишневе, Київської області із застосуванням автоматичного регулювання продуктивності насосних агрегатів. На цій станції встановлені дві групи по чотири насоси з електродвигунами потужністю по 22 кВт (перша група) і по 30 кВт (друга група). Першою групою із чотирьох насосів керує один перетворювач частоти виробництва "General Electric" серії VAT2000 потужністю 18,5 кВт, а другою "четвіркою" (з 30 кВт електродвигунами) - ПЧ тієї самої серії потужністю 22 кВт.

За даними експертів регулювання подачі води дає можливість отримати економію електричної енергії до 50% , а також знизити непродуктивні витрати води приблизно на $10\text{-}15\%$ і тепла до 10% . Зменшити аварійність мережі, а також зменшити витрати на планово-попереджувальні роботи.

Частотно-регульований електропривод насосних агрегатів заслуговує уваги водоканалів та підприємств ЖКГ, перш за все, можливістю відсутності «людського» фактору в процесі регулювання тиску в системах водопостачання та підтримки його в автоматичному режимі на заданому рівні незалежно від витрат.

Сьогодні питанням економії електроенергії приділяється першочергова увага.

Економія електроенергії на насосних станціях отримується шляхом:

- оптимального вибору режиму роботи електронасоса;
- використання електродвигунів і перетворювачів частоти з максимальним ККД;
- застосування оптимальних законів регулювання технологічних процесів.

Проаналізуємо більш детально всі складові енергозбереження на насосних станціях.

Згідно теорії ідеальний насос затратить в чотири рази менше енергії на перекачку одного і того ж об'єму рідини, якщо він буде працювати на половинній швидкості, чим на повній, проте час роботи в даній ситуації збільшується вдвічі.

Беручи цю обставину до уваги можна припустити, що реальний насос, працюючий в повторно-короткочастотному режимі, чи в режимі дроселювання також може здійснювати економію електроенергії, шляхом регулювання його продуктивності зміною швидкості. Цей факт підтверджено на практиці і досвід експлуатації реальних електронасосів, при частотному регулюванні швидкості (продуктивності), говорить про те, що реальна економія електроенергії досягає 30-40% залежно від режиму роботи насосної станції.

Коли треба досягти економії 60%, а інколи і 80%, то із застосуванням частотного приводу одночасно змінюють і насосне обладнання на сучасне, яке більш ефективне.

Якщо насос працює в постійному режимі і його продуктивність не можливо регулювати, то економію електроенергії можливо здійснювати тільки шляхом оптимального вибору насосного обладнання і мінімізації гідродинамічних втрат в трубопроводах.

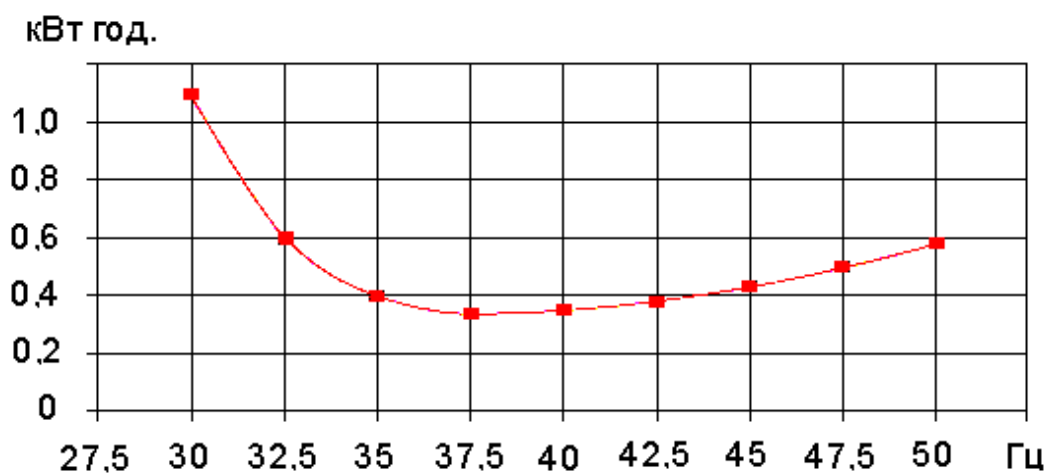


Рис.1.2.1 Закони регулювання і показники економії електроенергії

Для автоматичного регулювання тиску, витрат, рівня і т.і. стандартно застосовують ПД-регулятри, що змінюють вихідну частоту і напругу перетворювача частоти таким чином, що регулюємий параметр підтримується із заданною точністю, а на режим роботи насоса не впливають. Наприклад, при оцінюванні ефективності роботи частотно-регульованого електроприводу станції підкачки багатоквартирного будинку було встановлено:

- при витраті 8 кубічних метрів води на годину насос працював з частотою 28 Гц і витрати електроенергії становили 1,2 кВт/год.;
- при витраті 14 м³/год. насос працював з частотою 37 Гц, а витрати електроенергії дорівнювали 1,6 кВт/год.

Нескладно зрозуміти, що для даного наведеного випадку режим роботи насоса з частотою 37 Гц на 30% більш ефективний ніж при роботі на частоті 28 Гц.

Побудувавши графік залежності питомих витрат електроенергії на перекачку одного кубометра води (кВт год./м³) від швидкості насоса, можна зробити висновок про те, що максимальна економія електроенергії отримується при роботі насоса на діапазоні частот 35-45 Гц.(рис 1.2.1)

Для кожного конкретного випадку визначається експериментальним шляхом оптимальний частотний діапазон, в межах якого питомі витрати електроенергії на перекачку води будуть мінімальними, і по можливості, необхідно працювати в цьому діапазоні.

Каскадне включення насосів застосовується для оптимізації режимів роботи насосних установок при змінному графіку споживання води для отримання максимальної економії електричної енергії. Потужність насосів має бути різною, наприклад 25 кВт, 50 кВт, 100 кВт, 200 кВт і т.д.

Всі насоси мають працювати в оптимальному частотному діапазоні, тому для цього вони мають бути оснащені перетворювачами частоти. Проте якщо такої можливості не існує, то використовується режим обходу перетворювача

частоти, при цьому один перетворювач частоти почергово працює з одним із насосів, а якщо необхідно, то проводиться частотний пуск інших насосів.

Уникнення прямих пусків даного двигуна при використанні регульованого приводу дає можливість зменшити пускові струми, уникнути надлишкового тиску в магістралі і гідравлічних ударів, збільшити період служби трубопроводу і двигуна.

Не звертаючи увагу на значну вартість нових перетворювачів, окупність витрачених коштів за рахунок зекономлених ресурсів енергії. Це досить реальні терміни, особливо якщо враховувати багаторічний ресурс даної техніки, можна розрахувати очікувану економію коштів на тривалий період, а також прийняти правильне рішення.

Але більше приваблює така особливість як, уявлення самого вигідного інвестування грошей для підприємства. Вкладаючи гроші в перетворювачі частоти, ви гарантуєте що підприємство поверне ці гроші, за термін окупності, після чого протягом до 20 років приносить вам чистий прибуток.

Але не забувайте про комплексну автоматизацію технічного процесу. Адже новітні перетворювачі частоти мають широкий набір різних функцій і дозволяють спростити робочу схему системи.

Районні опалювальні установки забезпечують гарячою водою та опаленням житлові будинки, виробничі та інші приміщення. Циркуляція води в системі опалення забезпечують циркуляційними насосами. Опалювальні установки зазвичай розраховуються таким чином, щоб забезпечити споживачів теплом і гарячою водою в найхолоднішу пору року. Однак більшу частину часу опалювальні установки працюють з навантаженням, значно меншою максимальною, наприклад влітку вони використовуються тільки для гарячого водопостачання, тобто на мінімумі продуктивності. Разом з тим відомо, що обсяг води, який повинні подати в опалювальну систему циркуляційні насоси, зменшується не пропорційно зниженню потреби в теплі, а швидше. Так, при зменшенні потреби у теплі на

50% обсяг води, що перекачується повинен зменшуватися на 75%. Очевидно, що дросельне регулювання подачі гарячої води циркуляційними насосами в цьому випадку виявляється надзвичайно не вигідним.

Для заповнення витрати гарячої води в систему повинне надходити певна кількість холодної води із зовнішніх джерел. Це здійснюється підживлювальними насосами, які повинні забезпечувати подачу такої ж кількості води, яке було витрачено споживачами. Оскільки споживання гарячої води протягом доби сильно змінюється, то подачу підживлювальних насосів регулюють заслінкою, що так само неекономічне, як і на розглянутих вище прикладах насосних станцій холодного водопостачання.

Метою модернізації підживлювальних насосів є переведення їх електричної частини на сучасний рівень елементної бази з плавним і енергетично ефективним регулюванням частоти обертання двигунів насосів, створення динамічної і розвиненої системи автоматизації, захисту, контролю, сигналізації та діагностики. Для модернізації електрообладнання підживлювальних насосів пропонуються такі основні рішення:

- встановлення перетворювача частоти для плавного пуску і регулювання частоти обертання двигунів насосів;
- установка пристрою м'якого пуску для ненаголошеного запуску нерегульованих електроприводів насосів;
- установка програмованого контролера для регулювання тиску і подачі води, управління електроустаткуванням насосів, автоматизації роботи і діагностики електрообладнання;
- модернізація пульта керування та сигналізації.

При цьому зберігається можливість роботи насосів за існуючою схемою, з харчуванням двигунів від електричної мережі безпосередньо.

До числа об'єктів в системі тепlopостачання, для яких доцільне застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода, відносяться дутьевой вентилятор і димосос ко тельной установки. Регулювання співвідношення паливо - повітря за допомогою дуттєвого

вентилятора і розрядження в топці котла за допомогою димососа є однією з найбільш важливих завдань, так як це необхідно для підтримки якості теплоносія у регламентованих межах. Однак традиційний спосіб регулювання дроселюванням забезпечує задовільне рішення цього завдання не у всіх режимах роботи агрегату, тому виникла необхідність переведення зазначених турбомеханізмів на регульований привід. З точки зору енергозбереження найбільш ефективним для цього є застосування асинхронного приводу з частотним керуванням. При цьому цілком природним представляється переведення системи управління на сучасну елементну базу на основі програмованого контролера.

Частотно-регульовані електроприводи останнім часом застосовуються в ліфтах в нашій країні, а також і за кордоном. Це пояснюється наступним. Застосування регульованих приводів у ліфтах значно покращує показники комфортності роботи ліфта шляхом ефективного обмеження прискорень і ривків. Але пасажери при цьому практично не відчують руху. Перевагою є те, що створені частотно-регульованим приводом плавні перехідні процеси ведуть до значного зменшення динамічних навантажень в елементах кінематичного кола приводу, що покращує надійність і довговічність роботи механічного устаткування ліфта, зникає необхідність частої заміни редуктора, канатоведучого шківів, гальмівних колодок, електричного двигуна та елементів підвіски протитяги в процесі роботи ліфта.

Ще однією причиною застосування регульованого приводу в ліфтах, є зменшення енергоспоживання на 40-60%, що забезпечується в основному істотним зниженням моменту інерції лебідки головного електроприводу за рахунок усунення маховика з ведучого валу.

Застосування ППЧ дозволяє застосовувати в ліфтах асинхронні двигуни однієї швидкості з короткозамкнутим ротором загального призначення. Маховий момент ротора таких електродвигунів на порядок нижчий аналогічних ліфтових двошвидкісних двигунів, а вартість їх у 3-4 рази менша в порівнянні з двошвидкісними.

Результатом являється економічний ефект впровадження частотно-регульованого електропривода в ліфтах, який забезпечують економія електроенергії та зниження експлуатаційних витрат.

1.3. Досвід використання тиристорних перетворювачів для комунальної сфери.

Практика більшості держав доводить, що перші 20% заощадженої енергії отримуються тільки завдяки упорядкуванню енергетичного господарства та наведення елементарного порядку.

В той час як надання комунальних послуг вимагає значних енерговитрат, багато підприємств комунального господарства неспроможні платити за спожити ними газ та електроенергію.

Вирішити цю проблему дуже складно, особливо з огляду на те, що тарифи на газ та електроенергію, як правило, зростають швидше, ніж тарифи на тепло та воду, що ще більше підриває платоспроможність підприємств.

Повномасштабне запровадження реформ у комунальному секторі можливо тільки після проведення реформ на макроекономічному рівні, але ж вже зараз існує достатня кількість практичних заходів, що можуть бути впровадженні для зниження затрат та підвищення продуктивності комунальних підприємств.

Частотне керування асинхронним двигуном або частотно-регульований привод (ЧРП) вдалося застосувати із появою мікропроцесорних систем та потужних транзисторів.

На сучасному етапі розвитку ЧРП створені сучасні програмно-апаратні комплекси, які ефективно здійснюють частотне керування асинхронними двигунами.

ЧРП можна застосовувати для всіх механізмів, які працюють з приводом електродвигунів змінного струму та при заміні електроприводів постійного струму. В даному випадку між асинхронним двигуном і мережею встановлюють перетворювач частоти (ПЧ).

Нині найпоширенішим «регулюванням продуктивності» електронасосів і вентиляторів є усунення надлишкової потужності при дроселюванні витрат шляхом використання клапанів і заслінок. Та це економічно неефективно.

Використання ЧРП дає змогу точно управляти швидкістю й моментом електродвигуна по заданим параметрам у точній відповідності до характеру навантаження. Це, у свою чергу, дає змогу точно регулювати будь-який процес у найбільш економному режимі, без тяжких перехідних процесів в технологічних схемах і електричних мережах.

Пристрій частотного регулювання забезпечує підтримування такої швидкості обертання ротора електронасоса, яка необхідна для створення потрібного натиску при даному значенні розходу, методом зміни продуктивності насосного агрегату.

Треба зазначити, що для точного регулювання необхідне задання одного параметра: тиску. На практиці цілком достатньо втримувати тиск на обраному рівні.

Тож зараз я, Вам, хочу представити досвід використання частотно-регульованого електроприводу в об'єктах житлово-комунального господарства в Україні та за кордоном.

КП «Кіровоградське водопровідно-каналізаційне господарство»

Комунальне підприємство „Кіровоградське водопровідно-каналізаційне господарство Кіровоградської міської ради" надає житлово-комунальні послуги та займає одне із провідних місць серед комунальних закладів. Головною метою діяльності господарства є забезпечення споживачів питною водою та водовідведенням з наступним очищенням, надання послуг різним підприємствам, організаціям та установам всіх форм власності, і звісно фізичним особам. До основних видів діяльності комунального підприємства відноситься збирання, очищення та розподіл води, забезпечення приймання

та відведення стічних вод в комунальну каналізацію, ліквідація аварій та пошкоджень у водопровідних та каналізаційних системах.

Середньодобове постачання води на місто складає 55-60 тис. м³ на добу, враховуючі: із районного водогону «Дніпро-Кіровоград» - 45-50 тис. м³ на добу.; з місцевих джерел -10 тис. м³на добу. В резервуари (4 по 10000 м) Зони I надходить очищена вода з районного водогону "Дніпро-Кіровоград". В цілях знезараження проводять до хлорування води. З резервуарів Зони I вода самопливом подається в місто через два водогони $\varnothing$ 1000 і 1200мм. Водогін $\varnothing$ 1000 розміщується по території всього міста і переміщує воду до РЧВ V=2000m³ на насосну станцію Зони II-б - мікрорайон Велика Балка, Катранівка, частина Кущівки, 18 мікрорайон та Зони II-А. Водогін $\varnothing$ 1200мм довжиною 22 км. проходить за межою міста з північно-західної сторони і переміщує воду на РЧВ Зони II-А. Насосна станція Зони II-А транспортує воду майже на весь правобережний район міста та центр. Насосна станція Зони II-А має потужність 65 тис. м³/добу, на ній встановлено 2 частотно-регульованого АД потужністю по 250 кВт. На території розташовано 2 резервуари по 5000 м³ кожний. В водопровідних системах протяжністю 800,5км. побудовані та експлуатуються 8 водопровідних насосних станцій.

Споживачам міста подається дніпровська вода, а також вода із місцевих джерел, які поєднані в два водозабора: Лелеківський та Холодні ключі.

Лелеківський водозабор складається з 37 свердловин, з них 11, 2 робочих резервуари об'ємом 1000 м³ і 500 м³, дві насосні станції II підйому та хлораторна станція. Вода з Лелеківського водозабору транспортується на лівобережну частину Лелеківки, а також на насосну станцію III-го підйому Зони II-б. Зона II-б складається з трьох резервуарів: два об'ємом 1000 м³ і один 2000 м³. Водозабор Холодні ключі складається із свердловин, розташованих в Базарній (Холодні Ключі) - 17 штук, із них робочі - 6. балансі підприємства, ліквідація витоків води та інше.

Кропивницький.

Застосування регульованого приводу в центральних теплових пунктах

Передумови

Застосування енергоощадних систем є одним із найбільш ефективних напрямів вдосконалення експлуатації водоканалів, а також є найбільш результативним з огляду на скорочення обсягів споживання електричної енергії таким енергомістким устаткуванням, як насоси.

Проведення технічної модернізації обладнання направлене на скорочення споживання електричної енергії підвищувальними насосами холодної води, що встановлені в центральних теплових пунктах (ЦТП). Технічна модернізація проводилася на трьох ЦТП (ЦТП-10, ЦТП-12 та ЦТП-15), які розташовані у північно-західному районі міста, в частині багатоповерхової забудови.

У ЦТП встановлене насосне устаткування, технічні параметри якого наведені в таблиці 1.3.1

Таблиця 1.3.1

Технічні параметри насосного обладнання

ЦТП	К-ть насосів	Марка насоса	Характеристика насоса	Потужність двигуна
10	3	4К-12	$Q=90\text{ м}^3/\text{год}$, $H=34\text{ м}$, $n=970\text{ об/хв}$	$N_{\text{дв}}=13\text{ кВт}$
12	2	4К-12	$Q=90\text{ м}^3/\text{год}$, $H=34\text{ м}$, $n=970\text{ об/хв}$	$N_{\text{дв}}=11\text{ кВт}$
15	3	4К-12	$Q=90\text{ м}^3/\text{год}$, $H=34\text{ м}$, $n=970\text{ об/хв}$	$N_{\text{дв}}=22\text{ кВт}$

Через невідповідність функціональних властивостей насосів умовам експлуатації системи, на виході з насосної станції утворювався надлишковий тиск 5,6 атм. (наразі у водопровідній системі підтримується тиск на рівні 2-3 атм.). Це явище приводило до перевищення витрат електроенергії та високих втрат води у внутрішньо-будинкових водопровідних мережах та сантехнічних пристроях.

Необхідним було зниження тиску на виході з насосної станції до мінімально допустимого (для 9-ти поверхового будинку в межах 3,5-4,0 атм.).

Згідно таких умов потрібно було підганяти гідравлічні параметри насосів до умов роботи системи. Це можна було здійснити заміною насосів або регулюванням частоти обертання двигунів насосів.

Здійснені заходи:

ЦТП-10 та ЦТП-12

Для підтримки оптимального тиску та регулювання витрат на виході з ЦТП, було впроваджено регулювання частоти обертання робочих коліс насосів холодної води. З метою забезпечення виконання цієї задачі було встановлено обладнання компанії „Danfoss”. Таким чином здійснюється регулювання частоти обертів робочого колеса, тобто частоти обертів насоса залежно від тиску, який контролюється спеціальним датчиком, який встановлений на виході з насосної станції. Таким чином на ЦТП продовжували експлуатуватися попередні моделі насосів та двигунів.

ЦТП-15

На ЦТП-15 було запропоновано замінити три існуючі насоси на два нових насоси. Було встановлено два агрегати типу НД 125-100-160 з двигунами типу 1A1805, P=15кВт, n=970об/хв. Також на ЦТП було встановлено тиристорний перетворювач частоти (ТПЧ) фірми «Danfoss».

Це надало можливість ліпше пристосувати гідравлічні параметри насосів до умов роботи енергосистеми та зекономити електроенергію. Додатковий ефект дало те, що ціна ТПЧ для двигуна меншої потужності є істотно нижчою.

Розробка технічних заходів та проведення систематичних вимірювань параметрів роботи обладнання проводилось за Програмою "Реформування тарифів та реструктуризація комунальних підприємств в Україні", що фінансується Агентством США з питань міжнародного розвитку.

Пуско-налагоджувальні та монтажні роботи проводилися власними працівниками водоканалу за участю представників фірми «Danfoss» .

Отримані результати.

Застосування технологій регулювання частоти обертання двигунів насосів дало можливість отримати ряд конкретних результатів (табл.1.3.2). А саме, встановлення перетворювачів частоти для зміни обертів двигуна насоса надало можливість проводити плавне регулювання подачі рідини, при цьому підтримуючи необхідний тиск на заданому рівні. Проведене регулювання дозволило скоротити подачу води та, відповідно, частину стоків, та упередити гідроудари в напірній мережі. При цьому суттєво зменшилося енергоспоживання.

Таблиця 1.3.2

Результати впровадження проектів

Назва показників	Одиниці виміру	ЦТП-10	ЦТП-12	ЦТП-15
Кошторисна вартість робіт – всього	грн.	8932	7761	22388
в т.ч. - вартість насосів		7984	5380	6346
Кількість води, яка була перекачана				
- до впровадження проекту	м ³ /міс.	32360	18074	46732
- після впровадження проекту	м ³ /міс.	24890	13000	23730
Споживання електроенергії:				
- до впровадження проекту	кВт-год /міс.	6100	4980	11000
- після впровадження проекту	кВт-год /міс.	2000	1620	4990
Питоме енергоспоживання (по всіх водозаборах):				
- до впровадження проекту	кВт-год/м ³	0,188	0,275	0,235
- після впровадження проекту	кВт-год/м ³	0,08	0,125	0,21
Зменшення енергоспоживання	кВт-год/міс.	4100	3360	6010
Вартість заощадженої електроенергії	грн./міс.	1025	840	1502
Вартість зекономленої води (з урахуванням зменшення скиду в каналізацію)	грн./міс.	8739	5937	26912
Сумарна вартість зекономленої води та заощадженої електроенергії	грн./міс.	9764	6777	28414
Термін окупності	міс.	0,91	1,15	0,79

2. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Головною енергосиловою основою сучасного виробництва є електропривід, за допомогою якого електроенергія перетворюється в механічну і передається робочому органу. Очевидно, що енергоємність технологічного процесу або виробничого механізму залежить від особливостей його роботи, способів управління потоком електроенергії, що підводиться до двигуна (електромеханічного перетворювача), робочих характеристик виробничого механізму (тахограми роботи, залежності необхідної потужності на окремих ділянках циклу роботи, необхідності регулювання швидкості, наявності ділянок із змінною продуктивністю) і т.д.

Сучасні технологічні процеси і механізми вимагають управління (регулювання) технологічних параметрів і протікають оптимально (відповідно до виробничих вимог і енергоспоживання), якщо в системі управління є можливість впливати на процес регулювання продуктивності, інтенсивності, показників якості.

Приводний двигун вибирається за потужністю на максимальну продуктивність. При необхідності регулювання продуктивності і технологічних параметрів використовуються наступні способи управління процесом:

- 1) при нерегульованому електроприводі через механічну частину (дроселювання, засувки, клапани та ін.);
- 2) при регульованому електроприводі через систему управління електроприводом, яка забезпечує необхідний вид пускогальмівних процесів і регульованих за швидкістю режимів.

Взаємодію приводної машини (приводу) і приводної системи можна представити за допомогою характеристик, приведених на рис. 2.1, на яких літерою D відмічено сімейство характеристик електроприводу при різних

швидкостях обертання, E — характеристики навантаження приводної системи.

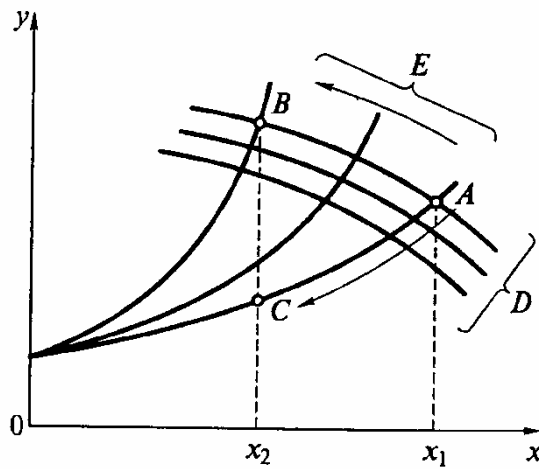


Рисунок 2.1. - Характеристики взаємодії приводу і приводної системи

По осі x відкладається кінетична енергія, швидкість, витрата. Інтервал $x_1 \dots x_2$ характеризує продуктивність, яку можна забезпечити. По осі y відкладають значення потенційної енергії, протидіючого моменту, висоту напору і т.д., тобто звичайно це значення протидіючого навантаження, яке приводу необхідно подолати. Точки перетину приводної характеристики (з сімейства характеристик D) і характеристики навантаження (з сімейства характеристик E) — це робочі точки. Продуктивність приводу можна змінювати або шляхом регулювання навантаження, тобто за рахунок механічної частини, коли при зменшенні продуктивності з x_1 до x_2 приводна система, переходить з точки A в точку B , що приводить до зростання протидіючого моменту і, отже, до збільшення споживаної потужності і енергії, або шляхом регулювання швидкості електроприводу, тобто застосуванням регульованого електроприводу, коли при зменшенні навантаження з x_1 до x_2 система переходить з точки A в точку C , що знижує протидіючий момент і, отже, зменшує споживані потужність та енергію в порівнянні з регулюванням навантаженням.

Звичайно, зрозуміло, що використання регульованого приводу, зокрема електроприводу, в поєднанні з системами технологічної автоматики дозволяє гнучкіше, плавно, динамічно і, головне, енергетично економніше впливати на виробничий процес, тому в даний час переважає і постійно розширяється тенденція передачі управління технологічним процесом від механічної частини системи автоматизованого регульованого електроприводу, що дозволяє забезпечити найкращі показники якості виробничого процесу і забезпечити значне зниження енергоспоживання і інших ресурсів.

Розглянемо цю тенденцію на прикладах, які далі будуть розширені і доповнені конкретними техніко-економічними показниками, які підтверджують обґрунтованість впровадження регульованих асинхронних електроприводів для управління багатьма виробничими механізмами.

Турбомеханізми. Електроприводи механізмів цього класу (насоси, вентилятори, компресори та ін.) споживають близько 25 % всієї електроенергії, що виробляється. До останнього часу в переважній більшості випадків в якості приводів вказаних механізмів використовувався нерегульований асинхронний двигун, що підключався напряму до номінальної напруги мережі, а для регулювання витрати (подачі) застосовувалось механічне управління через дросель, заслінку, клапан та ін.

Застосування ЧРАЕП дозволяє вирішити ряд технологічних задач (знизити або повністю ліквідувати гідравлічні удари, забезпечити необхідний рівень напору в системі) і одночасно за допомогою САУ швидкістю двигуна для підтримки постійності напору істотно знизити енергоспоживання і витрату ресурсів.

Ліфти. Механізми переміщення переважної більшості пасажирських ліфтів, номінальна швидкість яких складає 0,7...1 м/с, обладнуються двошвидкісними короткозамкненими АД. На початку переміщення (підйому або спуску) високошвидкісна обмотка АД підключається контакторами до номінальної напруги мережі 380 В, що приводить до виникнення значних знакозмінних ударних моментів через електромагнітні перехідні процеси в

асинхронній машині. Щоб забезпечити вимоги щодо обмеження прискорень в період розгону, збільшують в 8 —10 разів момент інерції електроприводу у порівнянні з власним моментом інерції двигуна, приєднуючи для цього до лебідки високо інерційний шків, тобто технологічно задача розв'язується за рахунок механічної частини електроприводу. Втрати енергії в перехідних процесах (при прямому пуску і гальмуванні) лінійно залежать від сумарного моменту інерції i , отже, зростають при його збільшенні [5]. Задача обмеження похідної прискорення, або «ривка», на початковому етапі перехідного процесу не розв'язується. При підході до місця зупинки АД при полі, яке ще не загасилось, перемикається на низькошвидкісну обмотку, щоб забезпечити режим зниженої швидкості. Таке перемикання супроводжується значними ударними перехідними моментами двигуна, що негативно впливає на механічну частину електроприводу ліфта, знижуючи її надійність і термін служби. Таким чином, існуюча система управління ліфтом не задовольняє сучасні технологічні вимоги, а робота його електроприводу пов'язана з підвищеним електроспоживанням.

При використанні для пасажирських ліфтів системи «напівпровідниковий перетворювач частоти — одношвидкісний асинхронний короткозамкнутий двигун» необхідні технологічні вимоги забезпечуються системою управління електроприводом. В цьому випадку відбувається плавний пуск електроприводу з обмеженням прискорень і ривків, ліквідовуються ударні моменти двигуна, виключається використання додаткового інерційного шківа, знижується момент інерції електроприводу, оскільки його значення у одношвидкісного двигуна істотно менше, ніж у двошвидкісного.

Крім того, при використанні ЧРЕП вдається різко знизити енергоспоживання за рахунок так званого частотного пуску і зменшення сумарного моменту інерції системи.

Підйомні крани. Більшість механізмів (зокрема, механізми підйому) кранів обладнана АД з фазним ротором. Процес пуску здійснюється за

характеристиками реостатного управління, коли з ротора дискретно виводяться ступені опору. У багатьох випадках гальмування крана здійснюється за рахунок використання режиму противмикання двигуна. Часті перемикання з рухового в гальмівний режим при підході до заданої точки зупинки механізму переміщення крана приводять до виникнення максимальних ударних моментів двигуна, прискореному виходу його з ладу і зниженню часу безаварійної роботи. Режим зниженої швидкості забезпечується введенням в ротор опорів, що пов'язане зі зростанням ковзання двигуна і збільшенням електричних втрат [5]. Отже, така система асинхронного електроприводу не вирішує технологічних задач і приводить до підвищеного енергоспоживання.

Використання ЧРЕП з короткозамкнутим АД дозволяє істотно підвищити надійність роботи підйомного крана, збільшити період його безаварійної роботи і зменшити електроспоживання.

Наведені приклади ілюструють загальну тенденцію переходу в широких масштабах до регульованого асинхронного електроприводу, передачі функцій управління технологічним процесом системі управління електроприводом в поєднанні з технологічною автоматикою, що приводить до виконання підвищених виробничих вимог при переході до регульованого електроприводу і зниження енергоспоживання. Попередні розрахунки показали, що при широкому застосуванні частотно-регульованих асинхронних електроприводів можна заощадити 7...10 % виробленої електроенергії [6].

2.1. Електроприводи ліфтів.

Для оцінки можливої економії електроенергії в електроприводах ліфтів було виконане моделювання процесів в двошвидкісному електроприводі ліфта і в частотно-регульованому. При моделюванні використані відомі моделі асинхронного електроприводу [9]. Розглянемо наступні величини, які

необхідні для оцінки енергетичних характеристик електроприводів за наслідками моделювання.

1. Механічна потужність на валу двигуна:

$$P_{\text{мех}} = M\omega, \quad (2.1.1.)$$

де $\dot{I}$, ω – відповідно момент і кутова швидкість двигуна.

2. Повна активна потужність, яка споживається з мережі:

$$P_1 = 3/2(u_{1u}i_{1u} + u_{1v}i_{1v}), \quad (2.1.2.)$$

де $i_{1u}, i_{1v}, u_{1u}, u_{1v}$ – відповідно проекції векторів струму і напруги статора в системі координат, що обертається.

Баланс потужностей без врахування втрат в сталі має вигляд:

$$P_1 = P_{\text{мех}} + \Delta P_{1\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}}. \quad (2.1.3.)$$

3. Сумарні втрати в міді:

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{1\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}} = P_1 - P_{\text{мех}}. \quad (2.1.4.)$$

4. Втрати в статорних ланцюгах:

$$\Delta P_{1\text{м}} = R_1(i_{sx}^2 + i_{sy}^2) \quad (2.1.5.)$$

5. Втрати в роторних ланцюгах:

$$\Delta P_{2\text{м}} = \Delta P_{\text{м}} - \Delta P_{1\text{м}}. \quad (2.1.6.)$$

6. Активна енергія, яка споживається з мережі:

$$W_1 = \int_0^{T_u} P_1 dt, \quad (2.1.7.)$$

де T_u – тривалість циклу.

7. Енергія втрат:

$$\Delta W_{\text{м}} = \int_0^{T_u} (P_1 - P_{\text{мех}}) dt. \quad (2.1.8.)$$

8. Цикловий ККД, тобто відношення механічної енергії до енергії, яка споживається з мережі за цикл роботи:

$$\eta_{\eta} = \frac{W_{\text{мех}}}{W_1} = \frac{\int_0^{T_{\eta}} P_{\text{мех}} dt}{\int_0^{T_{\eta}} P_1 dt}. \quad (2.1.9.)$$

В якості приклада на рис. 2.1.1 показані характеристики перехідних процесів в електроприводі пасажирського ліфта вантажопідйомністю 400 кг і швидкістю переміщення 0,71 м/с з лебідкою типа Л471.00.000, одержані при моделюванні.

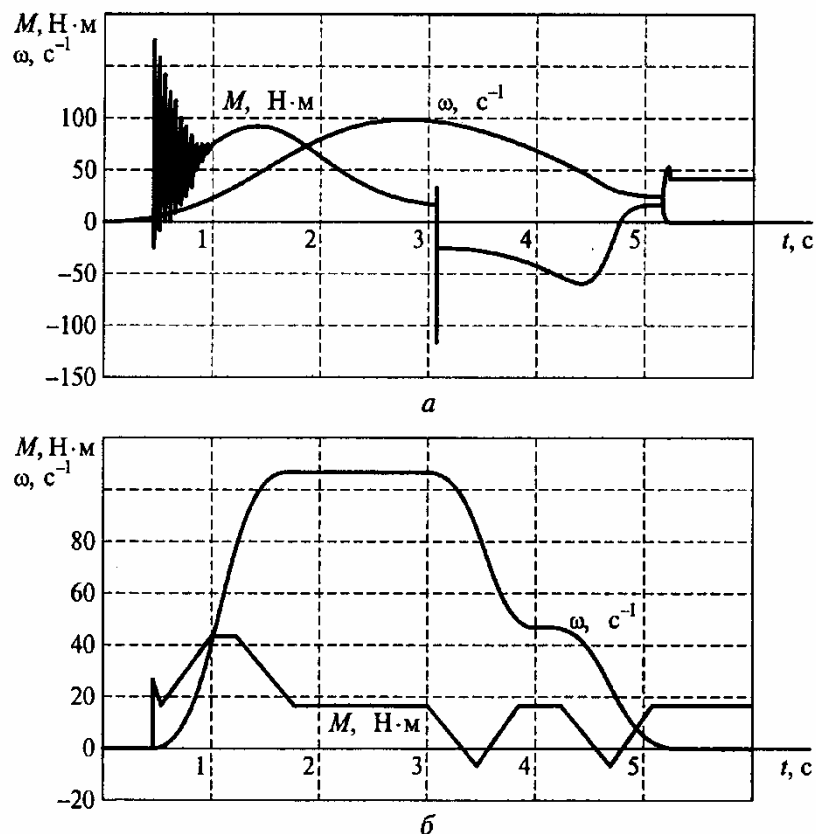


Рисунок 2.1.1. - Перехідні процеси в електроприводі ліфта при підйомі на один поверх з двошвидкісним нерегульованим (а) і частотно-регульованим (б) електроприводами

На рис. 2.1.1, видно, що перехідні процеси в двошвидкісному нерегульованому електроприводі супроводжуються значними динамічними зусиллями. Так, процес пуску характеризується ударним моментом, що становить 5,8 номінального на низькополюсній обмотці. Перехід на знижену

швидкість також характеризується ударним моментом, що становить 2,6 від номінального моменту двигуна на високополюсній обмотці. Такі значення ударних моментів приводять до прискореного руйнування кінематичної передачі, і, в такому випадку, потрібна періодична заміна і ремонт обладнання. У табл. 2.1.1. приведені технічні дані ліфта з різними системами електропривода, які використовувалися при моделюванні.

Результати енергетичних розрахунків для ліфта при 120 ввімкненнях в годину, тривалості ввімкнення, рівній 60 %, з яких включення на зниженій швидкості складають 10 %, а включення на робочій швидкості — 50 %, приведені в табл. 2.1.2, а на рис. 2.1.2 показані діаграми, що характеризують споживання енергії електроприводом ліфта.

Таблиця 2.1.1. Характеристики ліфта з різними системами електроприводу

Характеристики	Тип електроприводу	
	нерегульований	частотно-регульований
Тип електродвигуна	АНП18SA6/24	4A100L6Y3
Потужність, кВт	3/1	2,2
Номінальний струм, А	9/14,5	5,637
Момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,156	0,013
Момент інерції додаткових мас, що обертаються, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,94	0,083
Момент інерції поступально рухомих мас, приведених до валу двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,063	0,063
Сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	1,159	0,176

З аналізу даних табл. 2.1.2 виявляється, що за одну годину роботи ліфта з ЧРЕП витрачається на $0,757 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, або на 40 %, менше енергії, ніж з традиційним двошвидкісним. Вважаючи, що середній машинний час роботи ліфта 6,8 год за 1 добу, можна визначити економію електроенергії за добу, яка складе $5,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. За рік буде заощаджено $1879 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Економічний ефект від впровадження ЧРЕП ліфта забезпечується економією електроенергії і зниженням експлуатаційних витрат (для лебідки типа Л471.00.000 складає 31 024 грн за рік).

Таблиця 2.1.2. Розрахункові характеристики ліфта при 120 включеннях в годину

Характеристики	Тип електроприводу	
	нерегульований	частотно-регульований
Споживана енергія за 1 год роботи $W_1, \text{кВт} \cdot \text{год}$	1,898	1,141
Сумарні втрати за 1 год роботи $W_m, \text{кВт} \cdot \text{год}$	1,02	0,24
Втрати в статорі за 1 год роботи $W_{1m}, \text{кВт} \cdot \text{год}$	0,43	0,16
Втрати в роторі за 1 год роботи $W_{2m}, \text{кВт} \cdot \text{год}$	0,59	0,08
Цикловий КПД, %	46	79

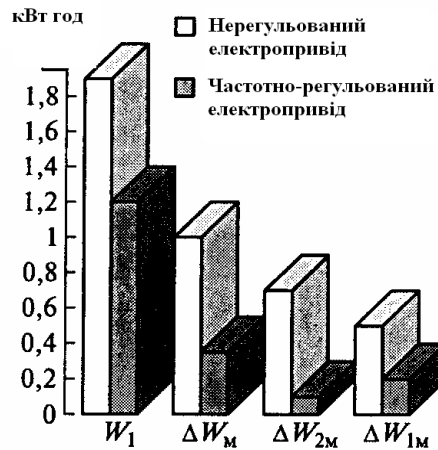


Рисунок 2.1.2. – Діаграми, що характеризують споживання енергії електроприводом ліфта

Розрахунки показують, що термін окупності залежить від вантажопідйомності та інтенсивності роботи ліфта та складає від трьох до восьми років. Менший термін окупності відповідно в ліфтів з більшою вантажопідйомністю та інтенсивністю роботи ліфта. Для розглянутого ліфта розрахунковий термін окупності рівний 6,4 роки.

2.2. Електроприводи відцентрових насосів.

Турбомеханізми, до яких відносяться і відцентрові насоси для перекачки води та інших рідин, споживають до 25 % всієї виробляємої електроенергії. Робота цих систем характеризується нерівномірним споживанням води, теплової енергії, а також повітря протягом доби залежно від кліматичних умов, пори року.

Потужність промислових насосів лежить в межах від одиниць кіловат до декількох десятків мегават. За призначенням розрізняють наступні групи насосів: комунального і промислового водопостачання; занурювальні для подачі води або нафти з свердловин; циркуляційні; живильні; водовідливу; для транспорту нафти, пульпи та ін.

Насоси, як правило, працюють на мережу з протитиском, причому статичний напір в мережі складає звичайно не менше 20 % повного напору.

Звичайно насоси обладнуються нерегульованим електроприводом. Регулювання подачі води здійснюється в основному єдиним способом — дроселюванням на стороні нагнітання. Регулювання подачі насосів застосовують в наступних випадках:

1. При необхідності регулювання кількості рідини, яка подається насосом, згідно вимог технологічного процесу або у випадку випадкової зміни потреби в рідині. Наприклад, подачу рідини циркуляційним насосом системи охолодження потрібно регулювати залежно від кількості теплоти, що підлягає відведенню; подача води насосом має регулюватися відповідно до режиму водоспоживання;

2. Якщо під час роботи регулювання подачі рідини насосом не вимагається, то забезпечення потрібної подачі проводиться первинним підрегулюванням насоса. Так, для подачі рідини на певну висоту h при постійних витраті Q і опору гідромережі за каталогом вибирається насос з найближчими, але більшим ніж необхідно номінальними напором і витратою води. Таким чином, для роботи із заданими параметрами, напір h (або) витрата води насоса повинні бути знижені до необхідних значень. при незмінній швидкості експлуатації насоса, простим способом регулювання його подачі є дроселювання, тобто часткове відкривання засувки на напірному трубопроводі насоса.

Станції водопостачання, як гарячого, так і та системи опалення будівель є характерним прикладом. Механізми цих станцій обираються по максимальній продуктивності. Значну частину часу вони працюють з меншою продуктивністю, що позначається зміною споживання в різні періоди часу. По деяким даним середньодобове завантаження насосів для холодного водопостачання становить 50...55 % від максимального. Діючі системи водопостачання з нерегульованим електроприводом не забезпечують істотного зменшення споживаної потужності при зменшенні витрати води, а

також обумовлюють при цьому істотне зростання тиску (напору) в системі, що приводить до витоків води і негативно позначається на роботі технологічного обладнання і мереж водопостачання.

На рисунку представлена енергетична і технологічна неефективність дросельного регулювання подачі води насосом. При цьому потужність, яка споживається насосом, визначається за формулою:

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta}, \quad (2.2.1.)$$

де P – потужність, Вт;

Q – подача, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – напір, м;

g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$;

ρ – густина рідкого середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$;

η – ККД насоса.

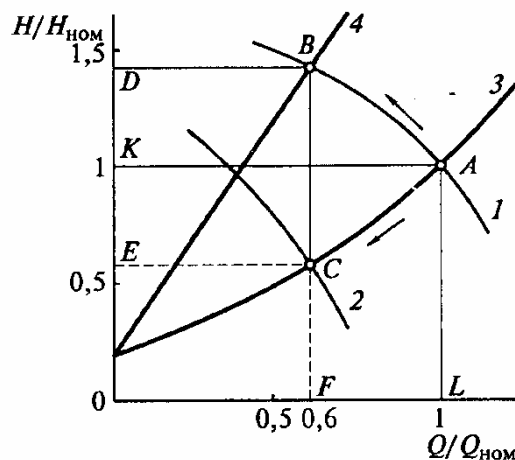


Рисунок 2.2.1.- Характеристики продуктивності відцентрового насоса шляхом дросельного та частотного регулювання.

На рис. 2.2.1 показані характеристики продуктивності відцентрового насоса при дросельному і частотному регулюванні. Крива 1 характеризує роботу нерегульованого електроприводу на номінальній частоті обертання, крива 3 показує роботу магістралі при максимально відкритій заслінці.

Значення витрати і напору води приведені на рис. 2.2.1 у відносних одиницях при використанні в якості базових величин номінальних значень витрати $Q_{ном}$ і напору $h_{м}$. Якщо витрати і натиск номінальні, то насос працює в точці А, а потужність, яка споживається насосом, пропорційна площі прямокутника $OKAL$. Зі зменшенням витрати при нерегульованому електроприводі (на рис. 2.2.1 для прикладу показана витрата води, що становить $0,6 \cdot H_{ном}$) шляхом дросельного регулювання здійснюється зміна опору магістралі (крива 4), насос робить в точці В кривої 1, що призводить до зростання натиску, який перевищує номінальний, а потужність насоса, пропорційна площі прямокутника $ODBF$, незначною мірою відрізняється від потужності, що споживається при номінальній витраті, тож, і енергоспоживання при зменшеній витраті змінюється несуттєво або практично не змінюється.

На ту обставину, що при дросельному регулюванні витрати (подачі) води зростає напір (тиск) в системі і практично не вдається знизити енергоспоживання, слід звернути особливу увагу. Експериментальні дані за структурою собівартості перекачування 1 м^3 води для різних років показані на рис. 2.2.2. Діаграма наочно підтверджує збільшення частки електроенергії в загальних витратах на підняття і перекачування води.

Враховуючи, що зростання вартості електроенергії носить випереджаючий характер у порівнянні з вартістю інших витрат, проблема енергозбереження при роботі насосів холодного і гарячого водопостачання набуває першочергового характеру. Додатковим фактором на користь необхідності застосування на насосних станціях енергозберігаючих технологій є істотні втрати (витоки) води в системі водопостачання, чому сприяє підвищення тиску (напору) в системі при дросельному регулюванні насосів. Це підтверджують і конкретні цифри, приведені в табл. 2.2.1, в якій показана витрата води в Україні на одну людину.

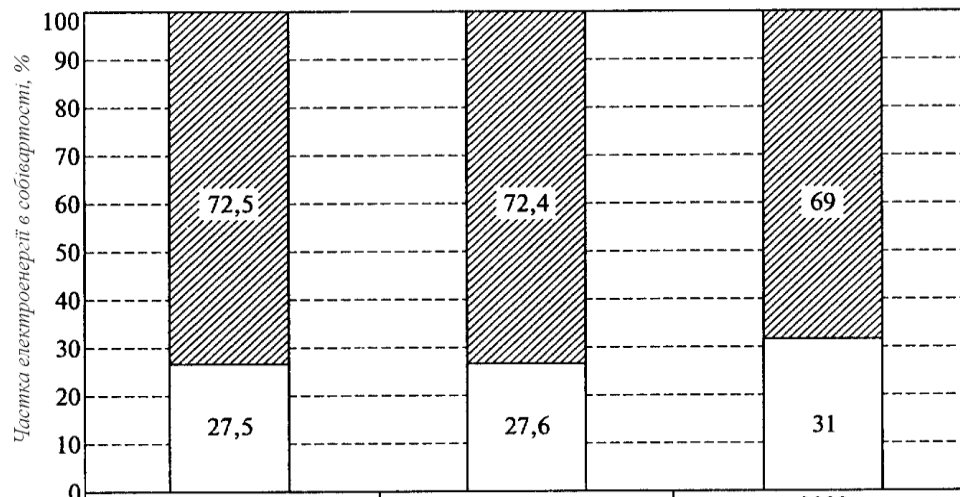


Рисунок 2.2.2.- Частка електроенергії у собівартості перекачування 1 м³ ВОДИ

Таким чином, приведені дані об'єктивно показують необхідність заміни систем дросельного регулювання насосних агрегатів на системи автоматичного управління за допомогою автоматичної підтримки необхідного технологічного параметра, а саме, напору (тиску) при змінній витраті води, за рахунок застосування ЧРАЕП.

Можливості енергозберігаючого управління при регулюванні швидкості електроприводу в порівнянні з дросельним регулюванням проілюстровані на рис.2.2.1. За рахунок зниження швидкості насос працює при зменшенні витрати в точці *C* на кривій 2 при постійній характеристиці магістралі (крива 3). Потужність, яка споживається електроприводом при цьому, пропорційна площі прямокутника *OECF*, що явно демонструє можливість значного зниження енергоспоживання при застосуванні регульованих електроприводів насосів. При цьому зменшується при зменшенні витрат води і натиск в системі, що призводить до зниження витрат (витоків) води.

Приведемо методики для наближеної порівняльної оцінки енергоспоживання при зміні подачі відцентрових насосів за рахунок ДР і ЧР швидкості АД насоса.

Таблиця 2.2.1.

Витрата води на одну людину в Україні і супутні йому втрати

Рік	Витрата води на одну людину, л/добу		Втрати, %
	Всього	В тому числі горячої	
2020	235	100	65
2021	400	160	40

Як показано вище, незмінний режим роботи насоса при постійній швидкості приводного електродвигуна характеризується точкою перетину характеристики насоса, що відповідає цій частоті, і характеристики магістралі, підключеної до насоса. Характеристикою насоса є залежність напору $\dot{I}$ від витрати Q , яку з достатньою точністю можна представити у вигляді:

$$H = H_{0н} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - CQ^2, \quad (2.2.2.)$$

де $H_{0н}$ – натиск насоса при $Q = 0$ і $\omega = \omega_{\dot{m}}$; $\omega_{\dot{m}}$ – номінальна швидкість електродвигуна; C – коефіцієнт насоса конструктивний, $C = (H_{0н} - H_{ном})/Q_{ном}^2$; $Q_{ном}$ і $H_{ном}$ – номінальні витрата і напір.

Характеристика магістралі визначається наступним виразом:

$$H = H_c + RQ^2, \quad (2.2.3.)$$

де H_c – статичний напір (протитиск), який відповідає $Q = 0$ (закритій заслінці); R – коефіцієнт опору магістралі, $R = (\dot{I}_{\dot{m}} - \dot{I}_{\dot{n}})/Q_{\dot{m}}^2$.

Характеристики засобів регулювання відцентрового насоса і магістралі приведені на рис. 2.2.3.

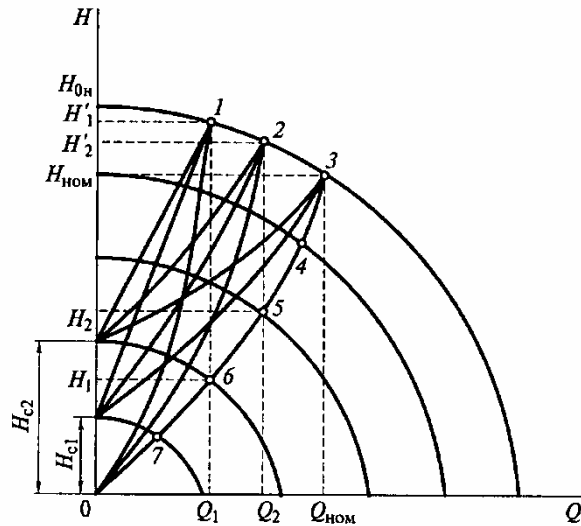


Рисунок 2.2.3.- Характеристики способів регулювання відцентрового насосу: 1, 2, 3 — робочі точки при дросельному регулюванні подачі; 4, 5, 6, 7 — робочі точки при регулюванні подачі за рахунок зміни частоти обертання двигуна

Потужність, яка споживається насосною установкою з мережі:

$$P_1 = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_1}, \quad (2.2.4.)$$

де $P_{\text{мех}}$ — потужність на валу двигуна насоса, $P_{\text{мех}} = M_c \omega$; M_c — статичний момент навантаження на валу двигуна; η_1 — ККД двигуна.

Регулювання подачі дросельною заслінкою ґрунтується на зміні опору магістралі. В цьому випадку при $\omega = \omega_{\text{н}} = \text{const}$ робоча точка механізму переміщується за $Q-H$ — характеристикою, відповідної номінальної швидкості двигуна, в сторону зменшення подачі води до точки перетину з новою характеристикою магістралі (точки 1, 2, 3 на рис. 2.2.3).

При електричному способі регулювання подачі води робоча точка переміщується за незмінною характеристикою магістралі (точки 4, 5, 6, 7 на рис. 2.2.3). При цьому зі зменшенням подачі зменшується і необхідний напір, що призводить до зменшення статичної потужності, потрібної для роботи насоса із заданою витратою води, в порівнянні з дросельним регулюванням.

Розглянемо ККД двигуна при різних способах регулювання подачі без врахування втрат в сталі і втрат від струму холостого ходу.

При частотному регулюванні, здійснюваному при постійності абсолютного ковзання:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \cdot \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} (1 + a)}, \quad (2.2.5.)$$

де $S_{ном}$ – номінальне ковзання двигуна;

a – відношення активних опорів фази статора R_1 і ротора R'_2 , $a = R_1 + R'_2$.

При регулюванні дросельною заслінкою, коли $\omega = \omega_{\hat{m}} = const$, ККД двигуна постійний і обчислюється за формулою:

$$\eta_1 = \frac{1 - S_{ном}}{aS_{ном} + 1}. \quad (2.2.6.)$$

Щоб одержати розрахункові вирази як функцію від витрати, ковзання двигуна можна виразити через витрату. Для цього у формулі (2.2.2) замінимо

$\left(\frac{\omega}{\omega_{\hat{m}}}\right)^2$ на $\left(\frac{1 - S}{1 - S_{\hat{m}}}\right)^2$ і, розв'язавши його спільно з виразом (2.2.3) відносно S ,

отримаємо:

$$S = 1 - (1 - S_{ном}) \sqrt{h_c + Q_*^2 (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{ном}) A, \quad (2.2.7.)$$

$$\text{де } h_c = \frac{H_c}{H_{0H}}; \quad Q_* = Q_{\hat{m}}; \quad A = \sqrt{h_c + Q_*^2 (1 - h_c)}.$$

Залежність моменту на валу турбомеханізма, який виражений у відносних одиницях при роботі його в мережу з постійними параметрами виглядає наступним чином:

$$\mu = \mu_{0c} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \frac{\omega}{\omega_{ном}} \sqrt{\frac{(\omega/\omega_{ном})^2 - h_c}{1 - h_c}}, \quad (2.2.8.)$$

де μ – відносний момент на валу турбомеханізма,

$$\mu = \frac{M}{M_{c \max}} \quad \text{де} \quad M_{c \max} - \text{максимальний статичний момент на валу}$$

механізму, що має місце при $\omega = \omega_{\text{н}} \quad$);

$\mu_{0\text{н}}$ – статичний момент на валу ($\dot{I}_{0\text{с}}$) при $Q_* = 0$ (закритій заслінці), виражений у відносних одиницях, $\mu_{0\text{с}} = \frac{\dot{I}_{0\text{с}}}{\dot{I}_{c \max}}$.

Вирази (2.2.7) і (2.2.8) дозволяють представити момент, ККД, швидкість і потужність, яка споживається з мережі, у вигляді функції від витрат води при заданому протитиску. З метою універсального використання розрахункових формул доцільно визначати потужність P_1 у відносних одиницях $\left(P_{1*} = \frac{P_1}{P_{\text{б}}} \right)$, прийнявши за базове значення потужності $P_{\text{б}}$ максимальну статичну потужність на валу двигуна $P_{c \max}$ при $\omega = \omega_{\text{ном}}$, тобто $P_{\text{б}} = P_{c \max} = M_{c \max} \omega_{\text{ном}}$.

Якщо вважати, що $M_{c \max} = M_{\text{ном}}$ де $M_{\text{ном}}$ – номінальний момент двигуна, $M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}$, то базова потужність $P_{\text{б}} = P_{\text{ном}}$.

Вирази для розрахунку P_{1*} при різних способах регулювання подачі насоса будуть виглядати наступним чином:

при дросельному регулюванні:

$$P_{1*} = \frac{[\mu_{0\text{с}} + (1 - \mu_{0\text{с}})Q_*] \cdot (1 + aS_{\text{ном}})}{1 - S_{\text{ном}}}, \quad (2.2.9.)$$

при частотному регулюванні:

$$P_{1*} = [\mu_{0\text{с}}A^3 + (1 - \mu_{0\text{с}})A^2Q_*] \cdot \left[1 + \frac{S_{\text{ном}}(1 + a)}{(1 - S_{\text{ном}})A} \right]. \quad (2.2.10.)$$

Вирази (2.2.9) і (2.2.10) дозволяють обрахувати потужність, яка споживається насосом при дросельному і частотному регулюванні в залежності від витрати рідини Q_* , і надати порівняльну оцінку для даних способів регулювання. Як впливає з (2.2.9), (2.2.10), при дросельному

регулюванні при заданому значенні Q_* , споживана потужність P_{1*} , залежить від $\mu_{0c}, a, S_{ном}$, а при частотному регулюванні — від $h_c, \mu_{0c}, a, S_{ном}$. Якщо задати ці параметри для певних умов роботи насосної установки і вибраного електродвигуна або серії двигунів, то можливо розрахувати значення $P_{1*} = f(Q_*)$.

В табл. 2.2.2 приведені відносні значення споживаної потужності P_{1*} у функції відносної витрати Q_* для дросельного і частотного регулювання при $\mu_{0н} = 0,4, a = 1, S_{м} = 0,04$.

Використовуючи формули (2.2.9) і (2.2.10), можна одержати відомі залежності, що ілюструють вигрaш в споживанні активної енергії при частотному регулюванні в порівнянні з дросельним регулюванням.

На рис.2.2.4. приведені залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ при дросельному і частотному регулюванні, побудовані за даними табл. 2.2.2. для $h_c = 0$.

Задаючи витрату (Q_{i*}) можна розрахувати споживану потужність при дросельному (P_{1i*1}) і частотному регулюванні (P_{1i*2}) і визначити вигрaш в

Таблиця 2.2.2.

Споживана електроприводом відцентрового насоса потужність при дросельному і частотному регулюванні в залежності від витрати рідини і статичного напору

Витрата Q_*	P_{1*}					
	Дросельне регулювання	Частотне регулювання				
		$h_c = 0$	$h_c = 0,2$	$h_c = 0,4$	$h_c = 0,6$	$h_c = 0,8$
0	0,41	0	0,04	0,1	0,19	0,29
0,2	0,53	0,01	0,07	0,17	0,27	0,4
0,4	0,65	0,07	0,16	0,26	0,38	0,51
0,6	0,77	0,22	0,32	0,42	0,53	0,65
0,8	0,89	0,52	0,59	0,68	0,75	0,81
1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02

споживаній потужності $\Delta P_{1i*} = P_{1i*1} - P_{1i*2}$, що дозволяє розрахувати зниження річних витрат за вартістю електроенергії при частотному регулюванні асинхронних електроприводів насосних агрегатів в порівнянні з дросельним регулюванням.

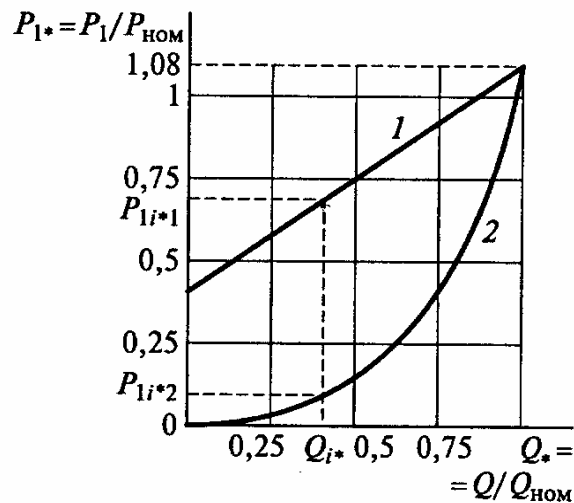


Рисунок 2.2.4.- Залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ при дросельному (крива 1) і частотному (крива 2) регулюванні

Як видно з табл. 2.2.2, зі збільшенням статичного напору h_c знижується економія електроенергії при впровадженні ЧРАЕП, проте при будь-яких значеннях h_c система технологічної автоматизації здійснює підтримку постійного натиску $\dot{I}$ в системі незалежно від витрат, що надає можливість уникати небажаних надлишків тиску, які властиві дросельному регулюванню. Це є дуже важливим, тому що в комунальній сфері для існуючих систем, які не знаходяться в аварійному становищі, кожна зайва атмосфера, а це приблизно тиск 10 м водяного стовпа, призводить до додаткових 2...7 % втрат води по причині витоків.

Для оцінки впливу початкового статичного моменту ($\mu_{0\bar{n}}$) на споживану потужність в табл. 2.2.3 приведені залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ для дросельного і частотного регулювання при $\mu_{0\bar{n}} = 0$ і $h_c = 0$.

Таблиця 2.2.3.

Споживана електроприводом відцентрового насоса потужність для різних способів регулювання при початковому статичному моменті $\mu_{0\bar{n}} = 0$ і статичному напорі води $h_{\bar{n}} = 0$.

Спосіб регулювання	Q_*					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
P_{1*} при дросельному регулюванні	0	0,2	0,41	0,61	0,81	1,02
P_{1*} при частотному регулюванні	0	0,01	0,07	0,22	0,53	1,02

Порівнюючи дані табл. 2.2.2 і 2.2.3, бачимо, що при зниженні $\mu_{0\bar{n}}$ виграш споживаної потужності при використанні ЧРЕП зменшується.

Приведені вище вирази (2.2.9) і (2.2.10) були одержані, припускаючи, що ККД насоса рівний одиниці і залишається незмінним при всіх режимах роботи. Насправді ККД насоса менше одиниці і знижується практично при будь-яких відхиленнях від номінального режиму роботи.

Відзначимо, що при моменті вентилятора статичного навантаження (при $\mu_{0\bar{n}} = 0$ і квадратичної залежності $\mu_{\bar{n}}$ від швидкості) відносні значення витрати, напору, моменту і потужності на валу двигуна (при використанні в якості базових одиниць їх номінальних значень) можуть бути виражені у функції кутової швидкості наступними виразами, які іноді називають законами подібності:

$$Q_* = \frac{Q}{Q_{ном}} = \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad (2.2.11)$$

$$H_* = \frac{H}{H_{ном}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \quad (2.2.12)$$

$$M_* = \frac{M}{M_{ном}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \quad (2.2.13)$$

$$P_* = \frac{P}{P_{ном}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^3, \quad (2.2.14)$$

де $\omega_{ном}$, $M_{ном}$, $P_{ном}$ – номінальні відповідно швидкість обертання, момент і потужність двигуна.

ККД насоса при цьому вважається постійним.

2.3. Електроприводи вентиляторів і турбокомпресорів.

Вентилятори займають серед турбомеханізмів друге місце після насосів за розповсюдженням в промисловості. Значна їх кількість складає вентилятори санітарно-технічного призначення, які здійснюють кондиціонування повітря у виробничих і інших приміщеннях. Не дивлячись на відносно низьку потужність цих вентиляторів (до 100 кВт) на їх частку припадає значна сумарна споживана енергія.

Потужні вентилятори використовуються для збільшення інтенсивності охолодження води в градирнях хімічних і металургійних комбінатів. Вони мають невисоку частоту обертання робочого колеса, звичайно не більше 600 об/хв.

Обмеження допустимої швидкості кінців лопаток робочого колеса вимагає зі збільшенням діаметру колеса знижувати його номінальну частоту обертання. Вентилятори володіють великим моментом інерції, найчастіше на порядок і вище він перевищує момент інерції приводного електродвигуна, що робить достатньо складним їх пуск, а в деяких випадках, вимагає використання електричного гальмування для термінової зупинки робочого колеса.

Вентилятори, відрізняючись від інших турбомеханізмів, майже завжди працюють на мережу без протитиску, як наслідок цього залежність моменту статичного опору на валу приводного електродвигуна від швидкості має квадратичний характер, а потужність, яка підводиться до вентилятора, якщо

не враховувати втрати на тертя в підшипниках прямо пропорційна кубу швидкості. Тому, для розрахунку режимів роботи вентиляторів можна використовувати вирази для закону подібності (2.2.11)...(2.2.14).

Вентилятори поділяються на відцентрові і осьові. Характеристики відцентрових вентиляторів подібні характеристикам відцентрових насосів. Серед аеродинамічних способів регулювання для відцентрових вентиляторів широко застосовується регулювання поворотом лопастей направляючого апарату. Ефект регулювання при цьому досягається внаслідок зміни перетину у бік зменшення вхідного каналу і закручування потоку в робоче колесо на вході.

Аеродинамічна характеристика димососа типа ДН-12,5-1 при регулюванні зміною кута $\theta_{н.а}$ повороту лопатей направляючого апарату і $n_{ном} = 1000 \text{ об/хв}$ показані на рис. 2.3.1. Звичайно, що при такому регулюванні подачі ККД вентилятора істотно падатиме. Поворот лопатей направляючого апарату може здійснюватися як вручну в міру необхідності, так і оперативно - за допомогою виконавчого двигуна. Проте, на практиці, пристрої зміни кута установки направляючого апарату в системах автоматичного регулювання використовуються рідко через складність експлуатації і внаслідок низької надійності. Ще менш економічним методом регулювання продуктивності вентиляторів є регулювання шибером перетину вихідного каналу вентилятора, таке, як при дросельному регулюванні насосів. При цьому не відбувається зміна характеристики вентилятора, як у попередньому випадку, а змінюється характеристика магістралі, як це відбувається в насосних установках.

Якщо подачу вентилятора регулювати зміною швидкості, то характеристика мережі відповідає формулі (2.2.3) при $H_c = 0$, тобто $H = RQ^2$, а ККД вентилятора у всіх межах регулювання залишається постійним.

Потужність, яка споживається з мережі двигуном вентилятора (без врахування ККД вентилятора), можна оцінити за виразами, отриманими з (2.2.9) і (2.2.10) при $h_c = 0$ і $\mu_{0c} = 0$. Так, при регулюванні шибром:

$$P_{1*} = \frac{1 + aS_{ном}}{S_{ном}} \cdot Q_*, \quad (2.3.1)$$

а при частотному регулюванні:

$$P_{1*} = Q_*^3 + \frac{S_{ном}(1+a)}{1-S_{ном}} \cdot Q_*^2. \quad (2.3.2)$$

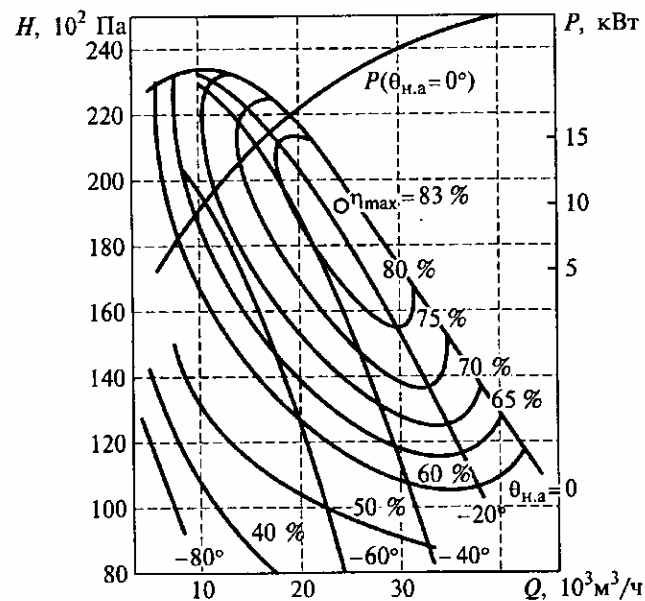


Рисунок 2.3.1. - Аеродинамічні характеристики димососа типа ДН-12,5-1 при регулюванні направляючим апаратом і $n_{ном} = 1000 \text{ об/хв}$.

Залежності споживаної потужності, побудовані згідно з формулами (2.3.1) і (2.3.2), показані на рис. 2.3.2. Пунктирною лінією дані графіки потужності двигуна з урахуванням ККД вентилятора. На рис. 2.3.2 видно, що споживана потужність в ЧРЕП вентилятора значно нижче, ніж при регулюванні шибром майже при будь-яких значеннях витрати Q_* , за винятком точки номінального режиму.

Осьові вентилятори [20] мають характеристики, показані на рис. 2.3.3, які формою відрізняються від характеристик відцентрових машин.

Відмінність полягає у тому, що ліва частина характеристик осьового вентилятора має провали і є нестійкою, через що його робота можлива тільки у області нижче граничного напору. Права (робоча) частина характеристики осьових машин має вигляд крутопадаючої.

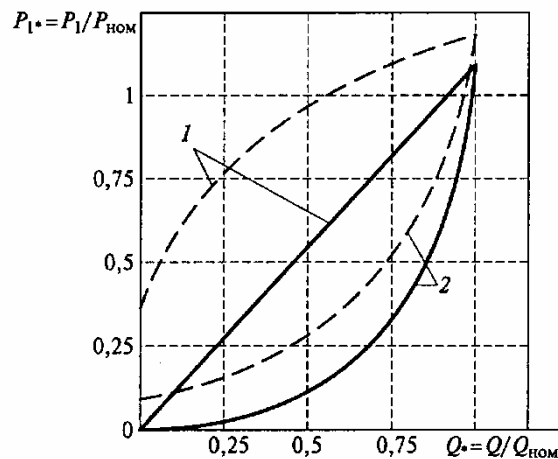


Рисунок 2.3.2. - Залежності зміни потужності, споживаної з мережі електроприводом вентилятора, при регулюванні шиббером (1) і частотному регулюванні (2)

Регулювання подачі осьових вентиляторів здійснюється зміною кута встановлення лопаток робочого колеса. Звичайно, поворот лопаток проводиться при зупиненому вентиляторі і займає відносно великий проміжок часу. Цей спосіб регулювання виявляється практично непридатним для систем автоматичного управління. Розроблені конструкції повороту лопаток на ходу істотно ускладнюють конструкцію вентилятора і знижують його надійність.

Криві рівних ККД осьового вентилятора (див. рис. 2.3.3) при регулюванні поворотом лопаток розташовуються перпендикулярно характеристикам $\dot{I} = f(Q)$, причому зі зменшенням напору ККД помітно падає, тоді як у відцентрових машин криві рівних ККД при регулюванні

направляючим апаратом розташовуються паралельно характеристикам $\dot{f} = f(Q)$.

Регулювання продуктивності осьового вентилятора зміною швидкості двигуна пов'язане з певними труднощами, яких немає у відцентрових машинах. Якщо встановити кут повороту лопаток рівним, наприклад, $\theta_{н.а} = 47^\circ$, то робота на мережу з характеристикою, такою як $0A_1$ (рис. 2.3.3), тобто з будь-якою характеристикою, яка проходить лівіше $0A_2$, виявиться неможливою, оскільки вентилятор потрапляє в зону нестійкої роботи.

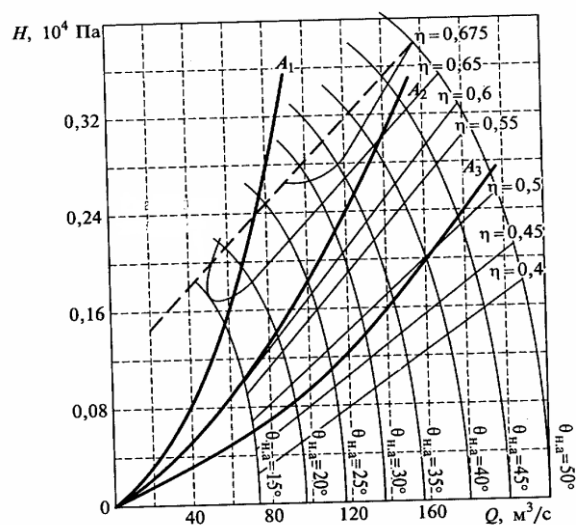


Рисунок 2.3.3. - Експлуатаційні характеристики осьового вентилятора серії В

Робота на мережу з характеристикою, що лежить правіше $0A_2$, наприклад $0A_3$, неекономічна, оскільки, не дивлячись на регулювання швидкості ККД вентилятора не перевищить 0,5. Тому, зона раціональної роботи осьового вентилятора з регулюванням тільки швидкості досить вузька і у ряді випадків потрібне комбіноване регулювання: періодичне при значних змінах характеристики мережі за допомогою повороту лопаток з одночасною зміною швидкості і безперервне в невеликому діапазоні зміни тільки швидкості. Враховуючи сказане, до регулювання осьових вентиляторів

потрібно підходити уважніше, ніж до регулювання відцентрових, проводячи попередній аналіз можливих режимів роботи.

Важливе значення для деяких вентиляторів має використання регульованого електроприводу, оскільки відомо, що ККД вентиляторів при регульованому електроприводі повинен бути більшим, ніж при нерегульованому, в середньому на 12 %. Окрім підвищення ККД застосування регульованого приводу вентиляторів дозволяє в деяких випадках спростити конструкцію турбомашин, виключивши направляючий апарат, а також забезпечити одночасну роботу двох і більш вентиляторів.

В даний час тенденції переходу до регульованого приводу для вентиляторів стали очевиднішими.

Вентилятори - це механізми з режимом тривалого навантаження та великою тривалістю роботи протягом року; навантаження на валу приводного двигуна спокійне, перевантажень не виникає. Вентилятори мають значний момент інерції, який необхідно брати до уваги при розрахунку пускових характеристик електроприводів.

Потрібний діапазон регулювання швидкості для вентиляторів зазвичай не перевищує 2:1. Глибше регулювання використовується рідко, якщо враховувати кубічну залежність споживаної потужності від частоти обертання.

Пуск вентилятора може проводитись як при розвантаженій машині, тобто при закритому направляючому апараті, так і при повністю відкритому. У першому випадку максимальний момент при пуску двигуна вентилятора дорівнює приблизно 0,4 номінального, а в другому — номінальному. При запуску потужних вентиляторів з великим діаметром робочого колеса звичайно потрібне обмеження прискорень при пуску, для того, щоб обмежити появи надмірних динамічних напруг в лопатках робочого колеса.

Перерахованим вимогам найбільше відповідає ЧРАЕП вентилятора. В даному випадку можна обмежитися використанням простих і недорогих систем частотного регулювання. Застосування цих систем характерне

вищому, ніж вентилятори, класу турбомашин, до якого відносяться турбокомпресори.

Потужність турбокомпресорів досягає 18 000 кВт, а в перспективі досягне 25 000 кВт і більше. Ці машини призначаються для підвищення тиску газу і транспортування його через магістральні трубопроводи.

Турбокомпресори залежно від ступеня стиснення газу поділяються на повітродувки зі ступенем стиснення нижче 1,15; нагнітачі, ступінь стиснення яких вище 1,15; компресори, що є машинами зі ступенем стиснення газу більше 1,15.

До типових областей застосування турбокомпресорів відносяться генерація пневматичної енергії (енергетичні турбокомпресори); транспортування газу через магістральні газопроводи; стиснення повітря для отримання кисню шляхом розділення; доставка повітря і кисню в доменну піч, холодильне устаткування.

Регулювання продуктивності турбокомпресорів здійснюється в основному дроселюванням на стороні нагнітання, ККД турбомеханізму при цьому знижується пропорційно регулюванню продуктивності. Для компресорів розроблена система регулювання шляхом повороту лопаток направляючого апарату. ККД при такому регулюванні буде вищим, ніж при дроселюванні. Проте використання направляючого апарату значно ускладнює конструкцію турбокомпресора і знижує його надійність, тому цей спосіб регулювання не набув широкого поширення. Найдосконалішим способом регулювання продуктивності турбокомпресорів є зміна швидкості їх двигунів.

Характеристики турбокомпресора типа К-3250-41-1 [20] при різних частоті обертання показані на рис. 2.3.4.

Особливість функціонування турбокомпресорів полягає в тому, що кожному значенню частоти обертання відповідає певне критичне значення подачі машини, нижче за яке її робота стає нестійкою. Важливою причиною нестійкої роботи турбокомпресорів є постійний зрив потоку з робочих і

направляючих лопаток, що приводить до сильних пульсацій тиску, відкриття і закриття зворотного клапана і виникнення аварійних коливань в системі. Такий режим називається помпажним. Робота турбокомпресорів в режимах лівіше межі помпажа (пунктирна лінія на рис. 2.3.4.) недопустима. Відзначимо, що зі зменшенням частоти обертання діапазон помпажних режимів скорочується, а тому при регулюванні за допомогою зміни частоти обертання робота турбокомпресора стає можливою із зниженою подачею.

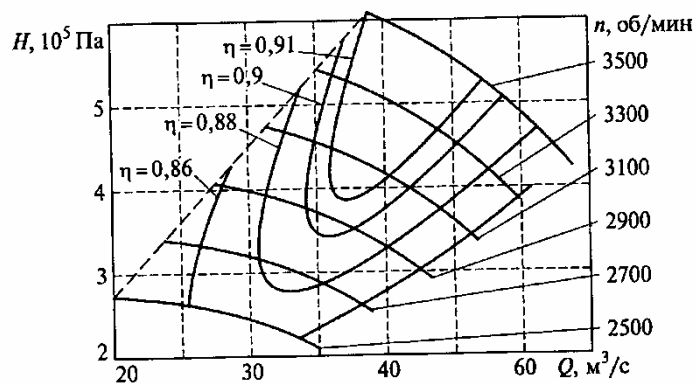


Рисунок 2.3.4. - Характеристики турбокомпресора типа К—3250-41-1 при різних частотах обертання

Технологічна необхідність регулювання подачі турбокомпресорних машин пов'язана з їх призначенням. А саме, режим роботи нагнітачів магістральних газопроводів представляється графіком споживання газу на кінці газопроводу. Метою регулювання подачі компресорів в цьому випадку є можливість забезпечення транспортування потрібної кількості газу при мінімальних енергетичних затратах. При скороченні споживання газу потрібне зниження його подачі, щоб не сталося зайвого підвищення тиску в трубопроводах. Зазвичай турбокомпресори на магістральних газопроводах поєднуються в станції, які складаються з декількох послідовно та паралельно ввімкнених компресорів, тому регулювання подачі газу ведеться ступінчасто, а саме зміною кількості працюючих машин. З метою плавного регулювання цей метод доповнюється дроселюванням на стороні нагнітання.

Дослідження показали, що застосування електроприводу, що забезпечує плавне економічне регулювання швидкості, дає збільшення ККД компресорної установки на 25 %, якщо порівнювати з регулюванням шляхом дроселювання і на 12 %, якщо порівнювати з регулюванням за допомогою направляючого апарату.

Турбокомпресори, нагнітачі і повітродувки зазвичай є установками з тривалим режимом навантаження, внаслідок чого їх електроприводи мають бути розраховані на тривалу роботу. Ці установки є швидкохідними механізмами та мають частоту обертання робочого колеса 3000...20000 об/хв, що підтверджує доцільність використання для їх приводів високошвидкісних електродвигунів. У тих випадках, коли потрібна велика частота обертання робочого колеса, між двигуном і компресором встановлюється підвищуючий редуктор.

Всі турбокомпресори, за винятком повітрядувок, працюють на мережу з опором, що визначає залежність моменту опору на валу компресора від частоти обертання.

Пуск турбокомпресора звичайно проводиться без навантаження шляхом сполучення порожнини нагнітання з атмосферою або з порожниною всмоктування, через що максимальний момент при пуску не перевищує 0,4 номінального.

Найдосконалішим способом регулювання продуктивності турбокомпресорів служить зміна їх частоти обертання. Основною проблемою при цьому є те, що більшість двигунів компресорів є високовольтними машинами. В даний час лише декілька заводів-виробників пропонують високовольтні перетворювачі частоти, вартість яких, як правило, набагато вища, ніж перетворювачів, що живляться від мережі 380 В. Крім того, часто пропонуються перетворювачі з подвійною трансформацією, коли на вхід і вихід звичайного низьковольтного перетворювача встановлюється відповідно знижуючий і підвищуючий трансформатори. Таке рішення не можна визнати економічно доцільним, оскільки ККД ПЧ при цьому знижується, зростають

матеріалоемність та його габаритні розміри. Виходячи з цього, слід визнати більш доцільним або використання безпосередніх ПЧ на основі звичайних тиристорів, або дволанцюгових високовольтних ПЧ з ланкою постійного струму на основі запірних тиристорів.

2.4. Електроприводи поршневих машин

Важливе місце в промисловому виробництві займають поршневі компресори і насоси, а також плунжерні насоси. Поршневі компресори знаходять застосування у виробництві полімерних матеріалів, в установках для розділення повітря, холодильних установках та ін. Поршневі і плунжерні насоси застосовуються у виробництві мінеральних добрив, на підприємствах легкої і харчової промисловості.

Поршневі і плунжерні насоси, а також поршневі компресори мають потужність від одиниць кіловат до декількох мегават. Поршневі насоси, як правило, відносно тихохідні, причому зі збільшенням потужності частота обертання їх менша і не перевищує звичайно 500 об/хв, а насоси невеликої потужності мають двигуни з частотою обертання 1000 і 1500 об/хв.

Особливістю поршневих машин є наявність кривошипно-шатунного механізму в кінематичній схемі. Момент опору на кривошипному валу механізму, створюваний одним поршнем, є періодичною функцією кута повороту валу. Момент, який створюється поршнем одного циліндра, визначається наступним виразом [20]:

$$M_c = \frac{FR}{\eta} \cdot \frac{\sin(\omega t + \alpha)}{\cos \alpha}, \quad (2.4.1)$$

де F – сила реакції поршня, Н, $F = \frac{\pi H D^2}{4}$, де H – тиск, що розвивається в циліндрі, Па; D – діаметр поршня, м);

R – радіус кривошипа, м;

η – ККД кривошипно-шатунного механізму і циліндра;

ω – кутова швидкість валу, с^{-1} .

α – миттєве значення кута між осями шатуна і штока.

Нехтуючи зміною кута α , в першому наближенні можна вважати, що момент змінюється в часі за синусоїдою. Для зменшення пульсацій навантаження поршневі машини виконуються, як правило, дво- або багатоциліндровими з відповідним зрушенням кривошипів кожного з циліндрів.

Для того, щоб пульсації моменту опору не викликали пульсацій моменту, що розвивається двигуном, на кривошипному валу звичайно передбачається маховик або застосовується електродвигун, що має значний момент інерції ротора.

Момент, який повинен розвивати двигун, можна представити у вигляді суми двох складових: постійного середнього $\dot{I}_{\text{ср}}$ і змінного значення моменту інерції, залежного від кута повороту кривошипа, кутової швидкості і жорсткості механічної характеристики двигуна:

$$M = M_{\text{ср}} + \frac{\Delta M}{\sqrt{1 + \left(\frac{J\omega}{\beta}\right)^2}} \left(\sin \omega t - \arctg \frac{J\omega}{\beta} \right), \quad (2.4.2)$$

де ΔM – амплітуда коливань моменту при швидкості;

J – момент інерції, приведений до валу двигуна;

β – коефіцієнт жорсткості механічних характеристик двигуна,
 $\beta = M_{\text{н.м}} / (\omega_0 S_{\text{н.м}})$.

Як впливає з формули (2.4.2), пульсації моменту двигуна будуть тим нижчі, чим більший момент інерції приводу і більша його швидкість, що треба обов'язково враховувати при застосуванні регульованого електроприводу, оскільки ступінь нерівномірності моменту при зниженні швидкості зростає.

Таким чином, наявність в кінематичній схемі поршневих машин кривошипно-шатунного механізму і необхідність використання маховика або двигуна з підвищеним моментом інерції визначають наступні їх особливості

як об'єкту електроприводу: пульсуючий характер моменту навантаження, залежність пульсацій від швидкості приводу; підвищений момент інерції, ускладнений пуск приводу; підвищений момент опору при пуску. Так, через низький ККД кривошипно-шатунного механізму і великого опору тертя спокою в циліндрах, пусковий момент навіть ненавантажених поршневих машин повинен бути не менше 1,2 номінального. В сучасних приводах поршневих машин значної потужності використовується нерегульований електропривод з синхронними двигунами, для машин середньої і малої потужності — з короткозамкненими асинхронними двигунами, та як правило, з підвищеним пусковим моментом. В деяких випадках для регулювання подачі застосовують двошвидкісні АД.

Застосування ТПН або ППЧ в електроприводах поршневих машин пов'язано з рядом проблем.

По-перше, це необхідність забезпечення високого пускового моменту. Багато перетворювачів мають спеціальний режим форсування напруги на двигуні (режим «кік-старт») для забезпечення зрушення двигуна, який повинен бути активізований для таких електроприводів. Відзначимо, що в деяких випадках доводиться завищувати потужність перетворювача для забезпечення необхідного моменту зрушення.

По-друге, в поршневих машинах спостерігається не така істотна залежність споживаної потужності від швидкості двигуна, як це мало місце в турбомашинах, тому економія електроенергії при переході до частотно-регульованого електроприводу буде не така значна (приблизно пропорційна зниженню швидкості). Це також означає, що в таких механізмах ТПН може використовуватися тільки для плавних пуску і зупинки, але не для регулювання швидкості двигуна, оскільки в цьому режимі втрати в двигуні різко зростають. При цьому треба розуміти, що у випадках, коли відповідно до технології потрібні часті зупинки поршневої машини, наприклад плунжерного насоса дозатора, то для мінімізації втрат в пускогальмівних режимах потрібен мінімальний сумарний момент інерції, а для мінімізації

втрат енергії в сталому режимі роботи зі змінним моментом опору момент інерції повинен бути якомога більший. У зв'язку з цим, момент інерції маховика, в таких випадках, повинен вибиратися після детального аналізу тахограми і діаграми навантаження приводу.

По-третє, для поршневих машин з тривалим режимом роботи момент інерції маховика повинен бути також оптимізований, виходячи з необхідного діапазону зміни швидкості (при зниженні швидкості відповідно до формули (2.4.2) пульсації моменту збільшуються) і допустимих значень амплітуди моменту двигуна.

2.5. Електроприводи конвеєрів і транспортерів

Рух стрічки конвеєра або транспортера, як правило, передається від АД через редуктор і приводний барабан. Момент на валу приводного електродвигуна конвеєра:

$$M_c = \frac{FR}{i_p \eta_p}, \quad (2.5.1)$$

де F – зусилля на приводному барабані, Н, $F = F_{xx} + F_{\Gamma} (F_{\delta\delta} - \text{зусилля, що витрачається на переміщення стрічки конвеєра або транспортера; } F_A - \text{зусилля, яке необхідне на переміщення вантажу});$

R – радіус приводного барабана;

i_p – передаточне число редуктора;

η_p – ККД редуктора.

Якщо вантаж на стрічці конвеєра відсутній, то електродвигун розвиває момент холостого ходу $F_{xx} = \frac{F_{xx} R}{i_p \eta_{p.x.x}}$, де $\eta_{p.x.x}$ – ККД редуктора, який відповідає $F_{\delta\delta}$.

Якщо врахувати лінійну залежність сил тертя від зусиль, що необхідні для переміщення вантажу, то залежність моменту на валу електродвигуна від зусилля на барабані виражається наступним чином: $M_* = M_{x.x*} + (1 - M_{x.x*}) F_{\Gamma*}$,

де $M_* = \frac{M}{M_{ном}}$; $M_{x,x*} = \frac{M_{x,x}}{M_{ном}}$; $F_{Г*} = \frac{F_{Г}}{F_{Гном}}$, де $M_{ном}$ – номінальний момент на валу двигуна, потрібний для руху стрічки і номінального вантажу з номінальною швидкістю; $F_{Гном}$ – складова зусилля F в тягнучому елементі конвеєра, яка створюється за рахунок руху тільки номінального корисного вантажу.

Дана складова $F_{Г}$ тягнучого зусилля, і лінійна швидкість переміщення V_* конвеєра визначають його продуктивність: $Q_* = F_{Г*} V_*$, де $Q_* = Q/Q_{ном}$, де $Q_{ном}$ – номінальна продуктивність конвеєра).

Якщо номінальна швидкість конвеєра постійна $V_* = 1$:

$$Q_* = F_{Г*},$$

тому потужність, що споживається з валу двигуна, можна записати у вигляді:

$$P_* = M_* \omega_* = M_{x,x*} + (1 - M_{x,x*}) Q_*, \quad (2.5.2)$$

де $P_* = P/P_{ном} = 1$; $\omega_* = \omega/\omega_{ном}$; $\omega = V_{ip}/R$; де $P_{ном}$, $\omega_{ном}$ – номінальні відповідно потужність і кутова швидкість на валу двигуна.

З формули (2.5.2) видно, що зі зниженням продуктивності ефективність роботи конвеєра знижується, оскільки підвищується відносна частка потужності, яка витрачається на здолаття моменту холостого ходу $M_{x,x}$.

Більш економічним є режим роботи конвеєра при змінній лінійній швидкості, що забезпечує таку саму продуктивність, але при постійності складової зусилля $F_{Г*} = 1$. Згідно з формулою (2.5.2) кутова швидкість в цьому випадку повинна змінюватися відповідно до закону $\omega_* = V_* = Q_*$, якому відповідає потужність на валу двигуна:

$$P_* = M_* \omega_* = [M_{x,x*} + (1 - M_{x,x*})] Q_* = Q_*, \quad (2.5.3)$$

Очевидно, що в цьому випадку, потужність на валу електродвигуна стає менша на величину:

$$\Delta P_* = M_{x,x*} (1 - Q_*). \quad (2.5.4)$$

Формула (2.5.4) показує, що чим більше момент холостого ходу, тим вищий ефект від регулювання лінійної швидкості конвеєра, і тим більше знижується його продуктивність.

Характерним прикладом є електропривід стрічкових ділянкових і магістральних конвеєрів вугільних шахт і гірничо-збагачувальних комбінатів, які працюють зі змінним навантаженням, зміни якого досить складно передбачити із-за випадкового характеру вантажопотоку. При цьому конвеєр може працювати холостому ходу до 20...40 % часу роботи конвеєра.

Для аналізу можливої економії енергоспоживання при використанні регульованого електроприводу стрічкового конвеєра порівняно з нерегульованим електроприводом розраховалось відносно споживання електроенергії при переміщенні вантажу однакового об'єму системами з нерегульованим електроприводом, з ЧРЕП, що надає плавне регулювання швидкості стрічки конвеєра, має двошвидкісний електропривод та різне співвідношення номінальних кутових швидкостей, яке дорівнює 1:2 і 1:3, та надає дискретне регулювання лінійної швидкості стрічки конвеєра.

При оцінці приймалося, що САУ ЧРЕП забезпечує підтримку постійного погонного навантаження конвеєра. В цьому випадку електропривід конвеєра експлуатується з оптимальною енергоємністю. Кількісні значення параметрів електроприводу приведені для стрічкового конвеєра типу 2Л80У. Одержані дані споживання електроенергії приводом конвеєра наведені в табл.2.5.1 у відносних одиницях. Базовим значенням прийнято значення споживання електроенергії нерегульованим електроприводом.

Аналіз даних з табл. 2.5.1 показав, що використання плавного регулювання лінійної швидкості стрічки, а саме за допомогою ЧРЕП, дає можливість зменшити енергоспоживання на 26...38 % на відміну від нерегульованого електропривода. Використання дискретного регулювання лінійної швидкості стрічки конвеєра із застосуванням двошвидкісного

електроприводу при співвідношенні кутових швидкостей 1:2 і 1:3 дозволяє зменшити споживання електроенергії на 5...21 % порівняно з нерегульованим приводом. Чим нижче завантаження конвеєра при застосуванні регульованого приводу, тим більше економія електроенергії.

Таблиця 2.5.1.

Споживання енергії конвеєрами в залежності від типу електроприводу і навантаження

Тип приводу конвеєра	Споживання електроенергії при завантаженні конвеєра, відн. од.	
	низьке	високе
Нерегульований асинхронний	1,0	1,0
Частотно-регульований асинхронний	0,62	0,74
Двохшвидкісний асинхронний із співвідношенням кутових швидкостей:		
1:2	0,79	0,92
1:3	0,80	0,95

Таким чином, застосування ЧРЕП конвеєра, яке надає плавне регулювання лінійної швидкості стрічки, дає можливість отримати максимальну економію електроенергії переміщення вантажу при непостійному вантажопотоці. Істотне значення має також можливість плавного пуску конвеєра.

Треба відзначити, що особливістю ЧРЕП конвеєра, є необхідність застосування АД з примусовим охолодженням, щоб при регулюванні кутової швидкості нижче за номінальну, критерії охолодження двигуна не змінювалися. Це забезпечує постійний, рівний номінальному значенню, момент на усіх швидкостях АД за умовою нагріву.

2.6 Енергетичні характеристики системи НПЧ-АД.

Проаналізуємо основні енергетичні характеристики частотно-регульованого асинхронного електроприводу та розглянемо показники енергетичної ефективності в системах ПЧ-АД при сталих та перехідних режимах.

Коефіцієнт корисної дії. Для оцінки економічності перетворення енергії системою ПЧ-АД в сталих режимах електроприводу використовується співвідношення між споживаною з мережі активною потужністю P і корисною потужністю на валу двигуна $P_{\text{мех}}$. Тоді

$$\eta_{\text{е.п}} = P_{\text{мех}} / P \quad (2.6.1)$$

При практичних розрахунках співвідношення (2.4) представляється у вигляді добутку коефіцієнтів корисної дії перетворювача частоти і асинхронного двигуна:

$$\eta_{\text{е.п}} = \eta_{\text{пч}} \eta_{\text{дв}} \quad (2.6.2)$$

Кожна з складових коефіцієнта корисної дії виражається через потужність втрат енергії в перетворювачі частоти і асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{пч}} &= P_1 / P = 1 - \Delta P_{\text{пч}} / P_1 + \Delta P_{\text{пч}} \\ \eta_{\text{дв}} &= P_{\text{мех}} / P_1 = 1 - \Delta P_{\text{дв}} / P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дв}} \end{aligned} \quad (2.6.3)$$

де P_1 — активна потужність, споживана двигуном від перетворювача.

Потужність втрат енергії в асинхронному двигуні. Дослідження втрат енергії в різних режимах електроприводу важливий з як погляду дослідження економічності роботи системи, так і для аналізу теплового стану двигуна в умовах вибору або перевірки його по умові нагріву.

При частотному способі регулювання швидкості визначаючих для асинхронного двигуна є слідучі різновиди втрат:

- втрати в міді обмотки статора $\Delta P_{1\text{м}}$ та обмотки ротора $\Delta P_{2\text{м}}$, обумовлені першими гармоніками струмів обмоток електродвигуна;

- втрати в сталі статора від гістерезису $\Delta P_{1\text{сг}}$ і вихрових струмів $\Delta P_{1\text{св}}$
- механічні втрати $\Delta P_{\text{мех.}}$
- додаткові втрати $\Delta P_{\text{доб}}$, пропорційні квадрату основної гармоніки струму статора електродвигуна.

Втрати в міді обмотки статора $\Delta P_{1\text{м}}$ та ротора $\Delta P_{2\text{м}}$ пропорційні квадратам їх струмів. У системі одиниць фізичних величин можемо записати формули для розрахунку втрат в обмотках в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}\Delta P_{1\text{м}} &= \Delta P_{1\text{м.ном}} \frac{i_1^2}{i_{1\text{ном}}^2}; \\ \Delta P_{2\text{м}} &= \Delta P_{2\text{м.ном}} \frac{i_2^2}{i_{2\text{ном}}^2},\end{aligned}\tag{2.6.4}$$

де i_1 $i_{1\text{ном}}$ — значення модулів результуючих векторів струмів обмоток статора і ротора, i_2 $i_{2\text{ном}}$ — значення модулів результуючих векторів струмів статора і ротора при номінальному режимі.

Втрати в сталі статора двигуна на гістерезис та вихрові струми пропорційні частоті і потоку двигуна:

$$\begin{aligned}\Delta P_{1\text{сг}} &= \Delta P_{1\text{сг.ном}} \frac{\psi_0^2}{\psi_{0\text{ном}}^2} \frac{\omega_1}{\omega_{1\text{ном}}}; \\ \Delta P_{1\text{св}} &= \Delta P_{1\text{св.ном}} \frac{\psi_0^2}{\psi_{0\text{ном}}^2} \frac{\omega_1^2}{\omega_{1\text{ном}}^2},\end{aligned}\tag{2.6.5}$$

де $\Delta P_{1\text{сгном}}$ $\Delta P_{1\text{свном}}$ — втрати в сталі статора двигуна на гістерезис і вихрові струми впри номінальному режимі; ψ_0 — модуль результуючого вектора головних потокозчеплень, ω_1 — кутова частота напруги статора; $\psi_{0\text{ном}}$

$\omega_{1\text{ном}}$ — значення модуля результуючого вектора головного потокозчеплення і кутової частоти напруги статора двигуна при номінальному режимі.

Механічні втрати вираховуються за виразом:

$$\Delta P_{\text{мех.}} = \Delta P_{\text{мехном}} (\omega_1 / \omega_{\text{ном}})^{3/2} \quad (2.6.6)$$

де $\Delta P_{\text{мехном}}$ — механічні втрати при номінальній швидкості обертання асинхронного двигуна; $\omega_{\text{ном}}$ — номінальна швидкість обертання електродвигуна.

Додаткові втрати $\Delta P_{\text{доб}}$, пропорційні квадрату струму обмотки статора, можуть визначатися по формулі :

$$\Delta P_{\text{доб}} = \Delta P_{\text{доп.ном}} \frac{i_1^2}{i_{1\text{ном}}^2}, \quad (2.6.7)$$

де $\Delta P_{\text{доп.ном}}$ - додаткові втрати двигуна при номінальному режимі роботи.

Сумарну потужність втрат енергії в асинхронному двигуні при частотному способі регулювання швидкості можна визначити по формулі:

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{1\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}} + \Delta P_{1\text{с.г}} + \Delta P_{1\text{с.в}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (2.6.8)$$

Як випливає з формул (2.6.5... (2.6.7), кожна з складових сумарних втрат (2.6.8) залежить від режиму роботи асинхронного двигуна.

Потужність втрат енергії в перетворювачі частоти. У перетворювачах частоти з АІН з живленням від некерованого випрямляча бувають наступні види втрат:

- втрати у вентилях некерованого випрямляча і в силових ключах автономного інвертора напруги;
- втрати в комутуючих реакторах і в фільтрах електромагнітної сумісності на вході випрямляча, а також в реакторі фільтру кола постійного струму, та у вихідних фільтрах і реакторах в разі їх встановлення;

- втрати в конденсаторах фільтру ланки постійного струму і вихідного фільтру;
- втрати в захисних RC- ланцюгах.

Значну частину повних втрат потужності в ПЧ мають електричні втрати у вентилях випрямляча, ключах інвертора та реакторах. Тому розрахунок електричних втрат в частотному перетворювачі є дуже важливим. Достовірне визначення електричних втрат аналітичними методами досить утруднене по причині складності врахування дискретних та нелінійних особливостей ПЧ, а тому при розрахунку втрат в ньому приймають припущення, які дозволяють відкинути другорядні складові. До таких припущень відносять ігнорування комутаційними процесами у випрямлячі та інверторі, що надає можливість зробити дослідження та опис процесів ПЧ по безперервним, або корисним складовим.

Представимо електричні втрати в ПЧ сумою електричних втрат в джерелі живлення автономного інвертора, що включають в нього вхідні комутуючі реактори, некерований випрямляч та реактор згладжуючого LC-фільтру кола постійного струму, та електричних втрат в автономному інверторі напруги з вихідним реактором:

$$\Delta P_{\text{ПЧ}} = \Delta P_{\text{дж}} + \Delta P_{\text{ін}} \quad (2.6.9)$$

де $\Delta P_{\text{дж}}$ електричні втрати в джерелі живлення АІН; $\Delta P_{\text{ін}}$ — електричні втрати в інверторі напруги. $\Delta P_{\text{дж}}$ представимо у вигляді наступної суми складових:

$$\Delta P_{\text{дж}} = \Delta P_{\text{рвх}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{зф}} \quad (2.6.10)$$

де $\Delta P_{\text{р.вх}}$ — втрати в мідних обмотках вхідних комутуючих реакторів; $\Delta P_{\text{в}}$ — електричні втрати у вентилях випрямляча; $\Delta P_{\text{зф}}$ — втрати в міді обмотки реактора згладжуючого фільтру ланки постійного струму.

Електричні втрати у вхідних комутуючих реакторах від основної гармоніки струму мережі розраховуються по формулі :

$$\Delta P_{\text{рвх}} = 3 R_{\text{рвх}} I_{\text{еф}}^2 \quad (2.6.11)$$

де $R_{рвх}$ — активний опір обмотки реактора; $I_{еф}$ — ефективне значення основної гармоніки струму реактора.

Ігноруючи втрати у випрямлячі і інверторі, можна скласти співвідношення між вхідними і вихідними струмами схеми ПЧ:

$$I_{эф} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{в}; \quad I_{в} = I_{и}; \quad I_{и} = \frac{P_l}{U_{и}}, \quad (2.6.12)$$

де $I_{в}$ — середнє значення вихідного струму випрямляча; $I_{и}$, $U_{и}$ — середні значення електричного струму і напруги на вході інвертора.

З урахуванням (2.6.12) електричні втрати в комутуючих реакторах джерела живлення АІН перетворюються до вигляду :

$$\Delta P_{р.вх} = \frac{18}{\pi^2} R_{р.вх} \frac{P_l^2}{U_{и}^2}. \quad (2.6.13)$$

Електричні втрати у вентилях некерованого випрямляча із застосуванням загальноприйнятої лінеаризації вольтамперної характеристики напівпровідникового діода:

$$\Delta P_{в} = 6(U_{гр} I_{д.ср} + R_{д.диф} I_{д.эф}^2), \quad (2.6.14)$$

де $U_{гр}$ — граничне, або пряме, падіння напруги на діоді; $R_{диф}$ — диференціальний опір діода для прямого струму; $I_{дср}$, $I_{деф}$ — середнє та ефективне значення струму діода. Якщо вихідний струм випрямляча ідеально згладжений, то:

$$I_{дср} = I_{д} / 3 \quad I_{деф} = I_{д} / \sqrt{3} \quad (2.6.15)$$

Тоді з урахуванням співвідношень (2.6.15) вираження електричних втрат (2.6.14) приводиться до наступного вигляду:

$$\Delta P_{\sigma} = 2 \left(\frac{U_{\Sigma p}}{U_u} P_1 + R_{\text{диф}} \frac{P_1^2}{U_u^2} \right) \quad (2.6.16)$$

Електричні втрати в реакторі згладжуючого фільтру кола постійного струму, де $R_{\text{рф}}$ — активний опір обмотки реактора.

Виразимо вихідний струм випрямляча через споживану активну потужність двигуном:

$$\Delta P_{\text{р.вх}} = R_{\text{рф}} P_1^2 / U_u^2 \quad (2.6.17)$$

Тоді потужність втрат енергії в елементах джерела живлення інвертора напруги при роботі АД в номінальному режимі:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{в1ном}} &= 2 \frac{U_{\Sigma p}}{U_u} P_{1ном} & \Delta P_{\text{в2ном}} &= 2 R_{\text{диф}} \frac{P_{1ном}^2}{U_u^2} \\ \Delta P_{\text{рвхном}} &= \frac{18}{\pi^2} R_{\text{рвх}} \frac{P_{1ном}^2}{U_u^2} & \Delta P_{\text{рфном}} &= R_{\text{рф}} \frac{P_{1ном}^2}{U_u^2} \end{aligned} \quad (2.6.18)$$

З урахуванням (2.6.16)...(2.6.18) отримаємо наступне вираження для сумарних електричних втрат для джерела живлення інвертора напруги:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ин}} &= (\Delta P_{\text{в1ном}} + \Delta P_{\text{в2ном}} \frac{P_1}{P_{1ном}}) \frac{P_1}{P_{1ном}} + \\ &+ (\Delta P_{\text{рвхном}} + \Delta P_{\text{рфном}}) \frac{P_1^2}{P_{1ном}^2} \end{aligned} \quad (2.6.19)$$

Таким чином, електричні втрати в джерелі живлення АІН, що містить некерований випрямляч із вхідним реактором, залежать від активної потужності, що споживається електродвигуном від перетворювача частоти. Одна частка сумарних електричних втрат, як видно їх вирази (2.6.19), пропорційна активній потужності, інша частка пропорційна її квадрату.

У автономних інверторах напруга використовується силові керовані напівпровідникові ключі на IGBT-транзисторах. Дані ключі володіють двосторонньою провідністю. На рис. 2.3.3.1 показані схема і вольт-амперна характеристика (ВАХ) силового ключа, що ідеалізується, на IGBT-

транзисторі. При першому приближенні втрати в силовому ключі визначаються на підставі його вольт-амперної характеристики. Пряма гілка вольт-амперної характеристики зумовлюється властивостями транзистора, а зворотна гілка визначається властивостями зворотного діода. При шматково-лінійній апроксимації прямої і зворотної гілок ключа (див. рис. 2.6.1, б) втрати при проходженні відповідно прямого і зворотного струмів визначаються по виразах:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{кл.пр}} &= U_{\text{гр.пр}} I_{\text{кл.пр.ср}} + R_{\text{кл.пр.диф}} I_{\text{кл.пр.еф}}^2 \\ \Delta P_{\text{кл.зв}} &= U_{\text{гр.зв}} I_{\text{кл.зв.ср}} + R_{\text{кл.зв.диф}} I_{\text{кл.зв.еф}}^2\end{aligned}\quad (2.6.20)$$

де $U_{\text{гр.пр}}$ $U_{\text{гр.зв}}$ — граничне падіння напруги при прямому і зворотному струмах; $I_{\text{кл.пр.ср}}$ $I_{\text{кл.пр.еф}}$ — середні значення прямого і зворотного струмів ключа; $R_{\text{кл.пр.диф}}$ $R_{\text{кл.зв.еф}}$ — диференціальні опори при прямому і зворотному струмах; $I_{\text{кл.зв.ср}}$ $I_{\text{кл.зв.еф}}$ — ефективні значення прямого і зворотного струмів ключа.

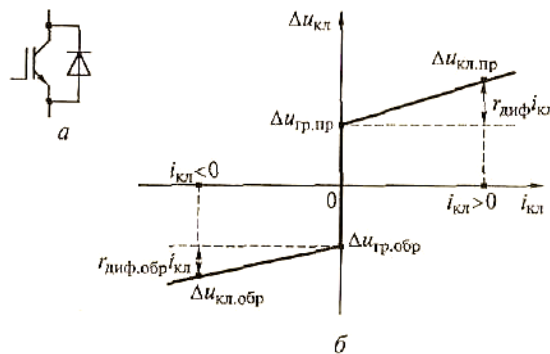


Рис. 2.6.1. Схема (а) і вольт-амперна характеристика (б) силового ключа, що ідеалізується, на IGBT-транзисторі

В результаті маємо середні значення струмів :

$$\begin{aligned}
I_{\text{кл.пр.ср}} &= \frac{i_1}{2\pi} \left(1 + \frac{\pi}{4} \mu \cos \varphi \right); \\
I_{\text{кл.обр.ср}} &= \frac{i_1}{2\pi} \left(1 - \frac{\pi}{4} \mu \cos \varphi \right)
\end{aligned}
\tag{2.6.21}$$

і ефективні значення струмів:

$$\begin{aligned}
I_{\text{кл.пр.эф}} &= \frac{i_1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{4}{3\pi} \mu \cos \varphi}; \\
I_{\text{кл.обр.эф}} &= \frac{i_1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4}{3\pi} \mu \cos \varphi},
\end{aligned}
\tag{2.6.22}$$

де μ — коефіцієнт модуляції; i_1 та u_1 — модулі векторів основних гармонік фазних струмів і напруги статора АД.

Для дослідження залежності сумарних втрат ПЧ від режиму роботи асинхронного електродвигуна значення електричних втрат в АІН виразимо в зручнішій формі запису:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{кл.и}} &= \left(\Delta P_{\text{кл.1ном}} + \Delta P_{\text{кл.2ном}} \frac{i_1}{i_{1\text{ном}}} \right) \frac{i_1}{i_{1\text{ном}}} + \\
&+ \left(\Delta P_{\text{кл.3ном}} \frac{P_1}{P_{1\text{ном}}} + \Delta P_{\text{кл.4ном}} \frac{i_1}{i_{1\text{ном}}} \right) \frac{P_1}{P_{1\text{ном}}};
\end{aligned}
\tag{2.6.23}$$

$$\Delta P_{\text{р.вых}} = \Delta P_{\text{р.вых.ном}} \frac{i_1^2}{i_{1\text{ном}}^2}.$$

Постійні величини $\Delta P_{\text{клинном}}$ та $\Delta P_{\text{р.вых.ном}}$ розраховуються по номінальних значеннях струму статора і активної потужності АД по наступних формулах:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{кл.1ном}} &= \frac{1}{2\pi} (U_{\text{гр.пр}} + U_{\text{гр.обр}}) i_{1\text{ном}}; \\
\Delta P_{\text{кл.2ном}} &= \frac{3}{4} (R_{\text{кл.пр.диф}} + R_{\text{кл.обр.диф}}) i_{1\text{ном}}^2; \\
\Delta P_{\text{кл.3ном}} &= \frac{U_{\text{гр.пр}} - U_{\text{гр.обр}}}{U_{\text{и}}} P_{1\text{ном}}; \\
\Delta P_{\text{кл.4ном}} &= \frac{8}{3\pi} \frac{R_{\text{кл.пр.диф}} - R_{\text{кл.обр.диф}}}{U_{\text{и}}} i_{1\text{ном}} P_{1\text{ном}}; \\
\Delta P_{\text{р.вых.ном}} &= \frac{3}{2} R_{\text{р.вых}} i_{1\text{ном}}^2.
\end{aligned}
\tag{2.6.24}$$

Вирази (2.6.23) і (2.6.24) показують залежність електричних втрат АІН від струму статора двигуна та активної потужності, які споживаються від перетворювача та змінюються з регулюванням швидкості та зміні моменту навантаження приводу.

Енергетичні характеристики мережі. До основних мережних енергетичних характеристик системи ПЧ-АД відносяться активна P , реактивна Q і повна S потужності, споживані з мережі електроприводом, а також коефіцієнт потужності, розраховані по основних гармоніках вхідного струму і напруги. Для сталого режиму роботи електроприводу мережні енергетичні характеристики приводяться до наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
P &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} i_{\text{в}} \left[u^2 - \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \omega_{0\text{э}} L_{\text{р.вх}} \right)^2 i_{\text{в}}^2 \right]^{1/2}; \\
Q &= \frac{18}{\pi^2} \omega_{0\text{э}} L_{\text{р.вх}} i_{\text{в}}^2; \\
S &= \frac{2}{3} ui = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} ui_{\text{в}}; \\
k_{\text{м(1)}} &= PS^{-1},
\end{aligned}
\tag{2.6.25}$$

де u — модуль результуючого вектора фазної напруги живлячої мережі;
 ω_0 — кутова частота напруги живлячої мережі на вході перетворювача; i —
модуль результуючого вектора фазних вхідних струмів.

Формули (2.6.25) враховують втрати в міді обмоток вхідних реакторів і реактора фільтру ланки постійного струму від основної гармоніки струму, споживаного ПЧ від мережі. Особливість запису мережевих енергетичних характеристик системи ПЧ-АД полягає в тому, що вони виражені через струм некерованого випрямляча, для визначення якого необхідно вирішити рівняння:

$$\frac{3\sqrt{3}}{\pi} i_B \left[u^2 - \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \omega_{03} L_{p.vx} \right)^2 i_B^2 \right]^{1/2} - \left(\frac{18}{\pi^2} R_{p.vx} + R_{p.f} \right) i_B^2 - \frac{3}{2} R_{p.vyx} i_1^2 - P_1 = 0 \quad (2.6.26)$$

при відомих значеннях напруги мережі u і активній потужності P_1 асинхронного двигуна.

За умови $L_{vx} = 0$ формули (2.6.23) перетворяться до наступного вигляду:

$$P = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} u i_B; \quad Q = 0; \quad S = P; \quad k_{m(1)} = 1. \quad (2.6.27)$$

Сумарні втрати енергії. У спільному випадку втрати енергії в системі ПЧ-АД під час перехідного процесу виражаються функціоналом:

$$\Delta W_{п.п} = \int_{\Omega}^{\Omega_{п.п}} \Delta p(t) dt, \quad (2.6.28)$$

де $\Delta p(t)$ — миттєва потужність сумарних втрат в системі; t — час перехідного процесу.

Миттєва потужність втрат енергії. Дослідження миттєвих втрат енергії важливе для оцінювання економічності роботи системи ПЧ- АД в перехідних

режимах електроприводу, а саме при пуску двигуна та, при переході від однієї швидкості до іншої і гальмуванні.

У спільному випадку втрати енергії під час перехідного процесу є миттєвою потужністю сумарних втрат в елементах перетворювача частоти та асинхронному двигуні: електричних втрат, магнітних, механічних і додаткових втрат. Але повне врахування сумарних втрат в перехідному процесі на рівні тих оцінювань, які були прийняті для сталого режиму, не є можливим, що підтверджується наступними причинами.

Аналітичне обрахування сумарних втрат в ПЧ і АД при динамічних режимах роботи, що супроводжуються електромагнітними перехідними процесами в перетворювачі і електродвигуні, є складним завданням. Приведені спільні рівняння динаміки системи ПЧ-АД вміщують тільки втрати енергії в міді обмоток реакторів ПЧ та втрати в міді обмоток статора і ротора асинхронного двигуна. Вирази для електричних втрат у вентилях випрямляча та напівпровідникових ключах автономного інвертора напруги, а також вирази магнітних втрат, механічних і додаткових втрат в електродвигуні прийнятні для постійних режимів роботи приводу. Застосування їх для розрахунку миттєвих сумарних втрат електроенергії в перехідних режимах вимагає додаткового обґрунтування. Переважні в спільній сумі втрат в перехідних режимах з середніми та значними навантаженнями є миттєві електричні втрати в електродвигуні:

$$\begin{aligned}\Delta p_{1\text{м}}(t) &= \Delta P_{1\text{м.ном}} \frac{i_1^2(t)}{i_{1\text{ном}}^2}; \\ \Delta p_{2\text{м}}(t) &= \Delta P_{2\text{м.ном}} \frac{i_2^2(t)}{i_{2\text{ном}}^2}.\end{aligned}\tag{2.6.29}$$

До електричних втрат в електродвигуні додаються електричні втрати в реакторному устаткуванні силової частки електроприводу:

$$\begin{aligned}\Delta p_{p.вх}(t) &= \Delta P_{p.вх.ном} \frac{p_1^2(t)}{P_{1ном}^2}; \\ \Delta p_{p.ф}(t) &= \Delta P_{p.ф.ном} \frac{p_1^2(t)}{P_{1ном}^2}; \\ \Delta p_{p.вых}(t) &= \Delta P_{p.вых.ном} \frac{i_1^2(t)}{i_{1ном}^2}.\end{aligned}\tag{2.6.30}$$

В результаті маємо миттєву оцінку енергетичної ефективності динамічних процесів в системі ПЧ-АД:

$$\Delta p_e(t) = \Delta p_{1м}(t) + \Delta p_{2м}(t) + \Delta p_{p.вх}(t) + \Delta p_{p.ф}(t) + \Delta p_{p.вых}(t)\tag{2.6.31}$$

Таким чином, сумарні втрати енергії в перехідному процесі системи ПЧ-АД оцінюватимемо надалі інтегральною характеристикою вигляду:

$$\Delta W_e = \int_0^{l_{пп}} \Delta p_e(t) dt\tag{2.6.32}$$

Миттєві мережні характеристики. Ці характеристики розраховуються по миттєвих значеннях напруги джерела живлення і струмів, споживаних перетворювачем, і включають миттєві активну p , реактивну q та повну s потужності, та коефіцієнт потужності по основній гармоніці:

$$\begin{aligned}p(t) &= \frac{3}{2} (u_u i_u + u_v i_v); \\ q(t) &= \frac{3}{2} (u_v i_u - u_u i_v); \\ s(t) &= \frac{3}{2} \sqrt{(u_u^2 + u_v^2)(i_u^2 + i_v^2)}; \\ k_{м(1)}(t) &= \frac{u_u i_u + u_v i_v}{\sqrt{(u_u^2 + u_v^2)(i_u^2 + i_v^2)}}.\end{aligned}\tag{2.6.33}$$

Вирази (2.6.31), (2.6.33) дозволяють обчислювати миттєві характеристики електроприводу і надавати попередню оцінку енергетичної ефективності частотно-регульованого асинхронного приводу як в постійних, так і в перехідних режимах.

На рис. 2.6.2 приведені тимчасові характеристики сумарних електричних втрат реактивної потужності, втрат струму, моменту, та швидкості, які є найбільш значними миттєвими енергетичними характеристиками асинхронного приводу з навантаженням вентилятора.

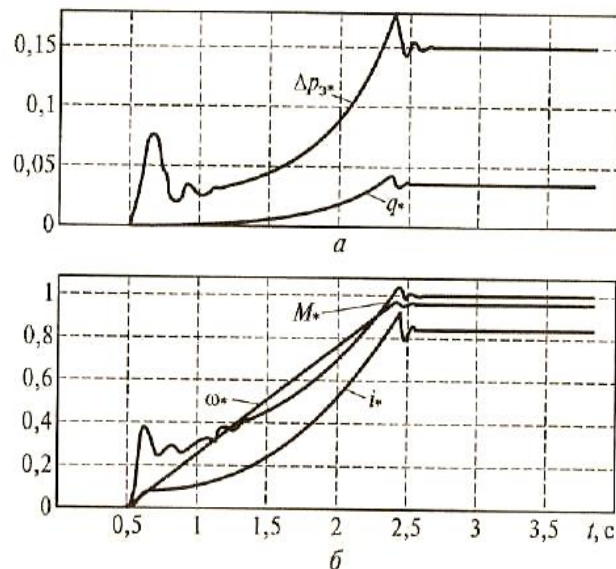


Рис. 2.6.2. Тимчасові залежності сумарних електричних втрат Δp_{Σ} , реактивній потужності q^* (а), струму i_{Σ} , моменту M , і швидкості ω , (б) при частотному пуску асинхронного електроприводу з навантаженням вентилятора

При частотному пуску двигуна типа 4A132M6, з номінальною потужністю 7,5 кВт, обчислені залежності миттєвих значень сумарних електричних втрат системи ПЧ-АД, струму і реактивної потужності $q(t)$, які споживаються від мережі, а також залежності електромагнітного моменту $M(t)$ та швидкості асинхронного електродвигуна. Результати розрахунку надаються у відносних одиницях.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ

3.1 Математичний опис елементів силової частини ТПЧ-АД.

Розглянемо математичну модель типової системи ПЧ-АД, схема силових ланцюгів якої представлена на рис. 3.1. До складу системи ПЧ-АД входять трифазний мостовий АІН з ШІМ вихідної напруги і короткозамкнутим асинхронним двигуном. Джерелом напруги для АІН служить некерований випрямляч з комутуючим реактором на вході і LC-фільтром на виході. Обмотка статора двигуна сполучена в зірку і підключена через реактор до виходу інвертора по схемі без нульового провідника.

При складанні математичної моделі силової частини ПЧ-АД використовуватимемо метод структурного моделювання, виділивши як окремі елементи АД, АІН з вихідним реактором і некерований випрямляч з вхідним комутуючим реактором і LC-фільтром на виході.

Рівняння асинхронного двигуна. Як початкова модель асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором приймемо наступну систему скалярних рівнянь:

$$\begin{aligned}
u_{1u} &= p\psi_{1u} - \omega_k \psi_{1v} + R_1 i_{1u}; \\
u_{1v} &= p\psi_{1v} + \omega_k \psi_{1u} + R_1 i_{1v}; \\
0 &= p\psi_{2u} - (\omega_k - \omega_s) \psi_{2v} + R_2 i_{2u}; \\
0 &= p\psi_{2v} + (\omega_k - \omega_s) \psi_{2u} + R_2 i_{2v}; \\
\psi_{1u} &= \psi_{0u} + L_{1\sigma} i_{1u}; \\
\psi_{1v} &= \psi_{0v} + L_{1\sigma} i_{1v}; \\
\psi_{2u} &= \psi_{0u} + L_{2\sigma} i_{2u}; \\
\psi_{2v} &= \psi_{0v} + L_{2\sigma} i_{2v}; \\
\psi_{0u} &= L_0 i_{0u}; \\
\psi_{0v} &= L_0 i_{0v}; \\
i_{0u} &= i_{1u} + i_{2u}; \\
i_{0v} &= i_{1v} + i_{2v}; \\
M &= \frac{3}{2} p_n (\psi_{0u} i_{1v} - \psi_{0v} i_{1u}); \\
p\omega_s &= p_n J^{-1} (M - M_c),
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

де $u_{1u}, u_{1v}, i_{1u}, i_{1v}, \psi_{1u}, \psi_{1v}$ — відповідно перетворена напруга, струми і повні потокозщеплення обмотки статора; $i_{2u}, i_{2v}, \psi_{2u}, \psi_{2v}$ — перетворені струми і повні потокозщеплення обмотки ротора; $i_{0u}, i_{0v}, \psi_{0u}, \psi_{0v}$ — результуючі струми намагнічування і головні потокозщеплення.

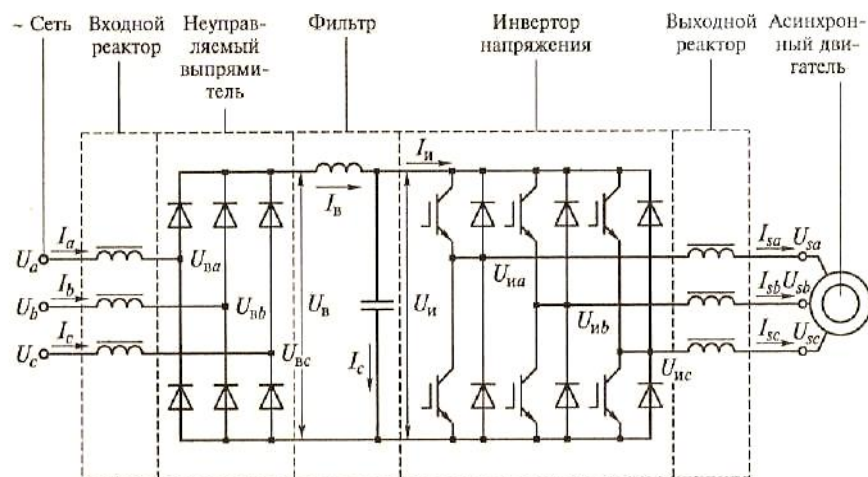


Рис. 3.1. Схема силових ланцюгів системи ПЧ—АД

Нагадаємо, що насичення магнітного ланцюга машини в моделі АД враховується за допомогою змінного коефіцієнта L_0 , залежного від струму намагнічування і визначеного залежністю $L_0 = L_0(i_0)$ де i_0 — модуль результуючого вектора струмів, що намагнічують. Для лінійного магнітного ланцюга коефіцієнт L_0 є постійною величиною.

Рівняння інвертора напруги. Автономний інвертор напруги з ШІМ є складним нелінійним дискретним пристроєм. Частота АІН на напівпровідникових приладах складає 2... 16 кГц. При такому високому рівні частоти для побудови математичних моделей АІН використовується метод виділення корисних сигналів шляхом усереднювання миттєвих значень змінних в межах періоду частоти. В цьому випадку інвертор напруги з симетричною двосторонньою ШІМ в прямокутній системі координат, що обертається, описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} f_u &= \frac{1}{2U_0} u_u^*; \\ f_v &= \frac{1}{2U_0} u_v^*; \\ u_{iu} &= u_u f_u; \\ u_{iv} &= u_u f_v; \\ i_u &= \frac{3}{2} (i_{1u} f_u + i_{1v} f_v), \end{aligned} \quad (3.2)$$

де u_u, u_v — перетворені задаючі дії; f_u, f_v — усереднені комутаційні функції; U_0 — амплітуда опорного сигналу; u_u — напруга джерела живлення інвертора; i_u — усереднений струм живлення інвертора; u_u, u_v — усереднена вихідна напруга інвертора; i_{1u}, i_{1v} — усереднені вихідні струми

Вихідні реактори моделюються рівняннями:

$$\begin{aligned} p i_{1u} &= L_{\text{рвих}}^{-1} (u_{iu} + \omega_k L_{\text{рвих}} i_{1v} - R_{\text{рвих}} i_{1u} - u_{1u}) \\ p i_{1v} &= L_{\text{рвих}}^{-1} (u_{iv} - \omega_k L_{\text{рвих}} i_{1u} - R_{\text{рвих}} i_{1v} - u_{1v}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$R_{\text{рвих}}, L_{\text{рвих}}$ — активний опір і індуктивність вихідного реактора.

Рівняння некерованого випрямляча. Для урахування головних особливостей некерованого випрямляча при аналізі енергетичних характеристик системи ПЧ-АД в перехідних і сталих режимах скористаємося математичною моделлю, що враховує тільки основну гармоніку комутаційної функції випрямляча. У прямокутній системі координат, що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k , безперервна модель некерованого випрямляча з вхідним реактором може бути представлена наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} u_u &= u_{vu} + L_{p.vx} p i_u - \omega_k L_{p.vx} i_v + R_{p.vx} i_u; \\ u_v &= u_{vv} + L_{p.vx} p i_v + \omega_k L_{p.vx} i_u + R_{p.vx} i_v; \end{aligned}$$

$$f_{vu} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos(\theta_i - \theta_k);$$

$$f_{vv} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sin(\theta_i - \theta_k);$$

$$u_B = \frac{3}{2} (u_{vu} f_{vu} + u_{vv} f_{vv});$$

$$i_u = i_B f_{vu}; \quad i_v = i_B f_{vv};$$

$$\omega_k = p \theta_k,$$

(3.4)

де u_u, u_v, i_u, i_v — перетворені основні гармоніки напруги і струмів мережі; u_{vu}, u_{vv} — перетворені основні гармоніки напруги на силовому вході некерованого випрямляча; f_{vu}, f_{vv} — перетворені основні гармоніки комутаційних функцій некерованого випрямляча; θ_i — кут повороту узагальненого вектора комутаційної функції випрямляча, або результуючого вектора струму мережі, щодо осі фази А напруги мережі; θ_k — кут повороту системи координат; u_B, i_B — напруга і струм на виході випрямляча; $R_{p.vx}, L_{p.vx}$ — активний опір і індуктивність вхідного реактора.

Рівняння для фільтру ланки постійного струму. Модель LC- фільтру на виході некерованого випрямляча описується лінійними рівняннями:

$$\begin{aligned}
 p i_{\text{в}} &= L_{\text{р.ф}}^{-1} (u_{\text{в}} - R_{\text{р.ф}} i_{\text{в}} - u_{\text{и}}); \\
 p u_{\text{и}} &= C_{\text{б.ф}}^{-1} i_{\text{с}}; \\
 i_{\text{с}} &= i_{\text{в}} - i_{\text{и}},
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

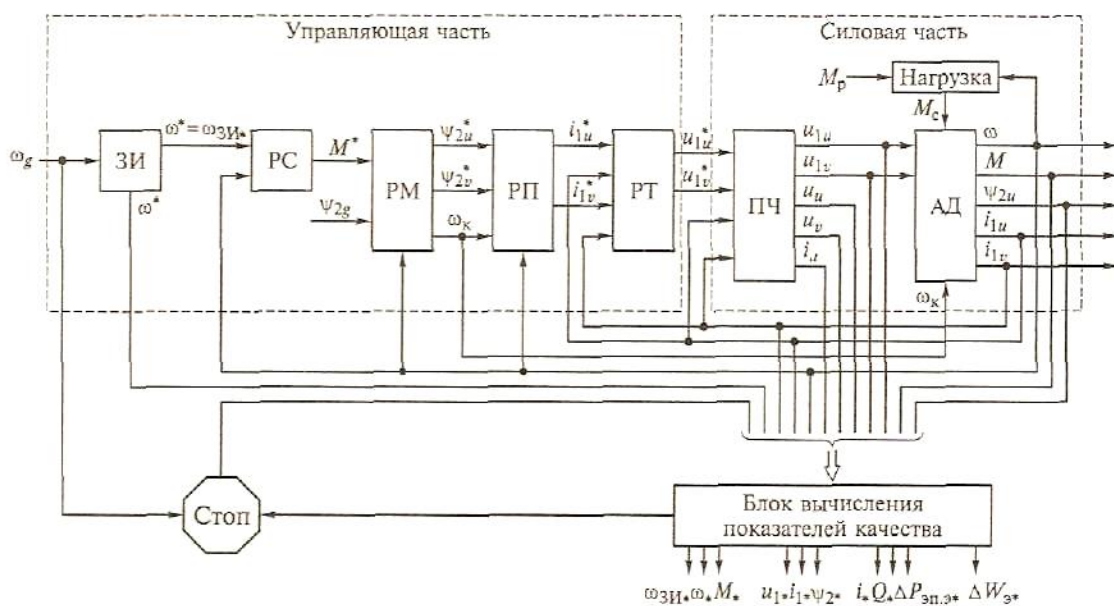
де $R_{\text{рф}}$, $L_{\text{рф}}$ — активний опір і індуктивність згладжуючого реактора LC-фільтра; $C_{\text{бф}}$ — ємність конденсаторної батареї фільтру; $i_{\text{с}}$ — струм конденсатора фільтру.

Розглянемо один з можливих підходів наближеного рішення задачі оптимізації режимів частотно-регульованого асинхронного електроприводу, що враховує сукупність електромагнітних явищ в двигуні і перетворювачі частоти, а також насичення електричної машини по головному магнітному шляху. Як оцінка ефективності функціонування асинхронного електроприводу приймемо сумарні електричні втрати енергії в силовій частині.

Об'єктом дослідження є асинхронний електропривод з векторною системою автоматичного управління, схема математичної моделі якого приведена на рис. 3.2. Силова частина електроприводу має АД з короткозамкнутим ротором і ПЧ з автономним інвертором напруги, одержуючим живлення від некерованого випрямляча. Силова частина описується рівняннями (3.1)...(3.5).

Система автоматичного управління електроприводу побудована за принципом керованого регулювання. Вона має замкнуті системи регулювання перетворених струмів статора, розімкнені системи регулювання перетворених потокосцеплення ротора і електромагнітного моменту, а також замкнуту систему регулювання швидкості ротора. На вході системи регулювання швидкості ротора встановлений задатчик інтенсивності.

Регулювальник перетворених струмів статора (РТ) є два послідовно включених двоканальних автономних регулювальника пропорційно-інтегрального типу. Сигнали задання i_{1u} та i_{1v} для РТ поступають з виходу регулювальника перетворених поточозщеплень ротора (РП) через аперіодичні фільтри першого порядку. Вихідні сигнали u_{1u} u_{1v} регулювальника струму є завданнями складових напруги статора. Вони подаються на входи управління перетворювача частоти. Математична модель РТ з фільтрами за завданням має наступний вигляд:



ЗИ - задатчик інтенсивності ; РС РМ РП РТ - регулювальники відповідно швидкості, моменту, поточкозщеплень ротора, струмів статора ; ПЧ - перетворювач частоти ; АД - асинхронний двигун.

$$\begin{aligned}
2Tpi_{1u}^{**} + i_{1u}^{**} &= i_{1u}^* ; \\
2Tpi_{1v}^{**} + i_{1v}^{**} &= i_{1v}^* ; \\
\varepsilon_{1u}^* &= i_{1u}^{**} - i_{1u}^* ; \\
\varepsilon_{1v}^* &= i_{1v}^{**} - i_{1v}^* ;
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
u_{1u}^* &= \left(k_{PT1} + \frac{1}{T_{PT1}p} \right) \left(k_{PT2} + \frac{1}{T_{PT2}p} \right) \varepsilon_{1u}^* ; \\
u_{1v}^* &= \left(k_{PT1} + \frac{1}{T_{PT1}p} \right) \left(k_{PT2} + \frac{1}{T_{PT2}p} \right) \varepsilon_{1v}^* ,
\end{aligned}
\tag{3.7}$$

де T — некомпенсована постійна часу по каналах; $u, v_1, k_{PT1}, k_{PT2}, T_{PT1}, T_{PT2}$ — коефіцієнти посилення і постійні часу послідовно включених регулювальників струму.

Регулювання перетворених поточозчеплень ротора виконується у вигляді оберненої моделі ланки об'єкту регулювання, рівняння якої мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
-R_2 i_{2u}^* &= p \psi_{2u}^* - \Delta \omega_K \psi_{2v}^* ; \\
-R_2 i_{2v}^* &= p \psi_{2v}^* + \Delta \omega_K \psi_{2u}^* ; \\
\psi_{0u}^* &= \psi_{2u}^* - L_{2\sigma} i_{2u}^* ; \\
\psi_{0v}^* &= \psi_{2v}^* - L_{2\sigma} i_{2v}^* ; \\
\psi_0^* &= (\psi_{0u}^{*2} + \psi_{0v}^{*2})^{1/2} ; \\
i_{0u}^* &= L_0^{-1} (\psi_0^*) \psi_{0u}^* ; \\
i_{0v}^* &= L_0^{-1} (\psi_0^*) \psi_{0v}^* ; \\
i_{1u}^* &= i_{0u}^* - i_{2u}^* ; \\
i_{1v}^* &= i_{0v}^* - i_{2v}^* .
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

Завданням для РП є сигнали $\psi_{2u} = \psi_{2g}$; $\psi_{2v} = 0$ формування яких покладається на систему регулювання електромагнітного моменту. Таке завдання орієнтує

результуючий вектор потокозчеплень ротора по одній з вісей декартової системи координат і задає його модуль ψ .

Регулювання електромагнітного моменту (РМ) виконується у вигляді оберненої моделі ланки моменту асинхронного двигуна, рівняння якого для вирішення завдання перетворюються до наступного виду:

$$T_{\text{МР}} M^{**} + M^{**} = M^*; \quad \Delta\omega_k = R_2 M^{**} / \psi_{2g}^2;$$

$$\omega_k = \omega + \Delta\omega_k; \quad \psi_{2u}^* = \psi_{2g}^*; \quad \psi_{2v}^* = 0,$$

(3.9)

де $T_{\text{М}}$ — постійна часу фільтру на вході РМ.

Вхід M^* регулювальника моменту підпорядкований регулювальникові швидкості ротора (РС), а вхід ψ_{2g} є заданням модуля вектора потокозчеплення ротора. При рішенні задачі оптимізації режимів асинхронного електроприводу цей сигнал можна розглядати як незалежна вхідна дія. Варіюючи сигналом ψ_{2g} можна знайти оптимальний по енергетичному критерію режим роботи електроприводу.

Регулювання швидкості ротора настроюється на модульний або симетричний оптимум залежно від технологічних вимог. Наприклад, при настроюванні РС на симетричний оптимум рівняння регулювальника мають наступний вигляд:

$$T_{\text{фр}} \omega^{**} + \omega^{**} = \omega^*; \quad \varepsilon_{\omega}^* = \omega^{**} - \omega^*; \\ u_{1u}^* = (\kappa_{\text{РС}} + 1 / T_{\text{РСР}}) \varepsilon_{\omega}^* \quad (3.10)$$

де $T_{\text{ф}}$ — постійна часу фільтру на вході РС; $\kappa_{\text{РС}}$ - коефіцієнт посилення; $T_{\text{РС}}$ — постійна часу регулювання.

Для зручності аналізу кінцеві результати моделювання в блоці обчислення показників якості наводяться до безрозмірних одиниць. Звернемо увагу ще на одну особливість математичної моделі системи електроприводу. У ній передбачена операція «Стоп», яка по сигналах завдання на швидкість ω_g і реальному сигналу ω швидкості вибирає час інтеграції миттєвих електричних

втрат силовій частини електроприводу при розрахунку інтегральної характеристики.

Таким чином, математична модель (див. рис. 3.2) відображає всі найбільш важливі при рішенні задачі оптимізації явища в силовій частині і головні особливості структурної побудови векторної системи управління асинхронним електроприводом. У такій моделі незалежно від заданої величини ψ_{2g} на вході регулювання моменту забезпечуються типові перехідні процеси. Отже, синтез оптимального управління по енергетичному критерію ведеться при заданій формі кривої швидкості, що наближає таку постановку завдання до реальної ситуації, але разом з тим викликає необхідність проведення великого об'єму обчислень, викликаних обліком додаткових чинників, властивих реальному електроприводу.

3.2 Дослідження роботи системи регульованого електроприводу насосної станції за допомогою математичної моделі.

Застосування частотно-регульованого електроприводу дозволяє отримати наступні переваги :

1. Невисока вартість впровадження і експлуатації.
2. Скорочення експлуатаційних витрат на обслуговування.
3. Економія електричної енергії до 15-50%, з врахуванням різноманітних добових режимів роботи.
4. Стабільність створюваного тиску за рахунок автоматичного регулювання продуктивності насоса.
5. Підвищення ресурсу занурювального насосу труб і замкової арматури шляхом вимикання пускових струмів, ліквідації гідравлічних ударів, плавного регулювання та плавного пуску і зупинки.
6. Перспектива інтеграції з системами обліку витрат води і електроенергії.
7. Перспектива роботи з автономними аварійними джерелами.

8. Автоматичний режим роботи, який повністю обслуговує.
9. Наявність декількох свердловин дає можливість періодичної зміни працюючого насоса.
10. При зниженні продуктивності одного насоса автоматичне ввімкнення другого (за наявності декількох свердловин).

Розглянемо роботу насосної станції при застосуванні частотно-регульованого електроприводу:

Насосна станція складається з чотирьох насосних агрегатів типа 1Д800-56 з асинхронними приводними двигунами типа 4АМН315У3S1, $P_{ном}$, що мають $=200$ кВт, $n_{ном} = 1470$ об/мин $I_{ном} = 363$ А. Одночасно працюють два насоси, два інших знаходяться в резерві .

Таблиця 3.2.1

Характеристики двигуна :

Величина	Значення
$P_{2ном}$, кВт	200
Синхронна частота оберту, об/хв	1470
ККД, %	92,0
$\cos\varphi$	0,9
X_μ , від. од.	6,95
R_1 , від. од.	0,029
X_1 , від. од.	0,1042
R_2 від. од	0,01737
X_2 , від. од.	0,13
J_d , кг·м ²	0,52
$S_{ном}$, %	1,4
Число пар полюсів	$2p=2$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.1737}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.000553 \text{ (Гн);} \quad (3.11)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.1042}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.000332 \text{ (Гн);} \quad (3.12)$$

$$L_{12} = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{6.95}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.022 \text{ (Гн);} \quad (3.13)$$

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{12} = 0.022332 \text{ (Гн);} \quad (3.14)$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_{12} = 0.022553 \text{ (Гн);} \quad (3.15)$$

$$L_1^g = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} = 0.00087 \text{ (Гн);} \quad (3.16)$$

3.2.1 Математичний опис системи

Електричні машини в спільному випадку багатофазні. Вони виражаються системами диференціальних рівнянь високого порядку, дослідження яких утруднене. Від багатофазної електричної машини до двофазної можна перейти без зниження якості.

Формули перетворення 3/2 і 2/3:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = k_c \left(x_A - \frac{1}{2}x_B - \frac{1}{2}x_C \right); \\ x_{1\beta} = k_c \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x_B - \frac{\sqrt{3}}{2}x_C \right), \end{cases} \quad (3.17)$$

де k_c - коефіцієнт узгодження,

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = k_c \left(x_A + \frac{1}{2}x_C + \frac{1}{2}x_A - \frac{1}{2}x_C \right) = \frac{3}{2}k_c x_A; \\ x_{1\beta} = k_c \frac{\sqrt{3}}{2} (x_B - x_C), \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} x_A = k_c x_{1\alpha}; \\ x_B = k_c \left(-\frac{1}{2}x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}x_{1\beta} \right); \\ x_C = k_c \left(-\frac{1}{2}x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}x_{1\beta} \right), \end{cases} \quad (3.19)$$

де $k_c = \sqrt{\frac{2}{3}};$

Рівняння для перетворення 3/2:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}}x_A - \sqrt{\frac{1}{6}}x_B - \sqrt{\frac{1}{6}}x_C; \\ x_{1\beta} = \sqrt{\frac{1}{2}}x_B - \sqrt{\frac{1}{2}}x_C, \end{cases} \quad (3.20)$$

Рівняння для перетворення 2/3:

$$\begin{cases} x_A = \sqrt{\frac{2}{3}}x_{1\alpha}; \\ x_B = -\sqrt{\frac{1}{6}}x_{1\alpha} + \sqrt{\frac{1}{2}}x_{1\beta}; \\ x_C = -\sqrt{\frac{1}{6}}x_{1\alpha} - \sqrt{\frac{1}{2}}x_{1\beta}. \end{cases} \quad (3.21)$$

Впровадження перетворення 3/2 в системі Simulink виглядає таким чином:

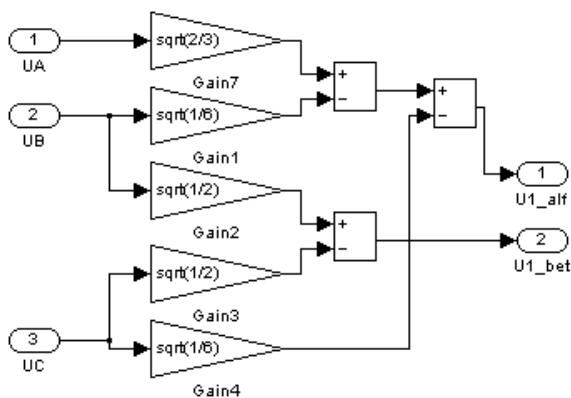


Рис.3. 3. Схема перетворення 3/2.

3-х фазна синусоїдальна напруга подається на вхід блоку перетворення 3/2, на виході отримується 2-х фазну напругу статора:

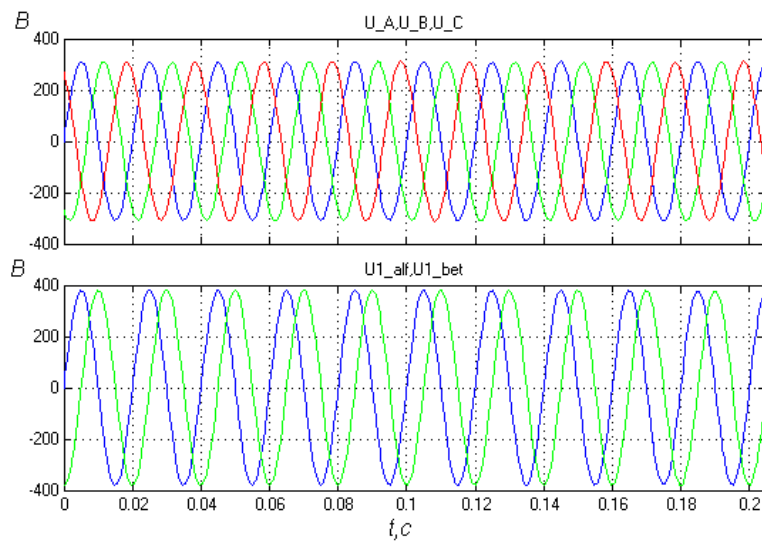


Рис.3.4. Осцилограма 3-х фазної напруги і 2-х фазної напруги статора

Впровадження перетворення 2/3 виглядає наступним чином в системі Simulink:

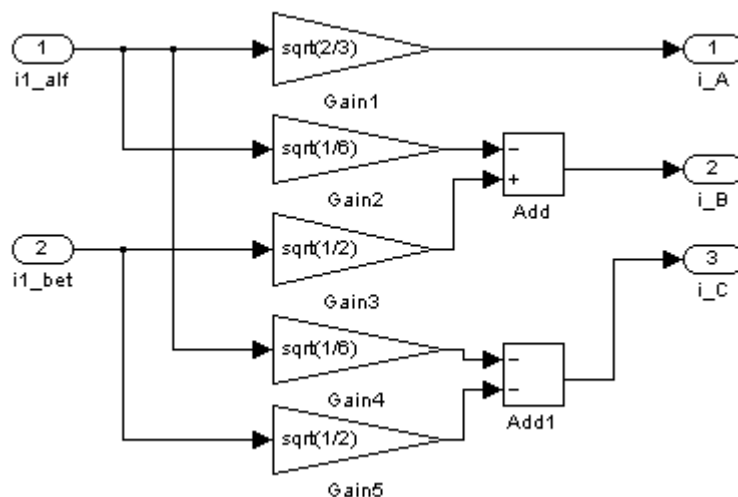


Рис.3.5. Схема перетворення 2/3.

Подаються 2-х фазні струми статора на вхід перетворювача 2/3, на виході отримуються 3-х фазні струми:

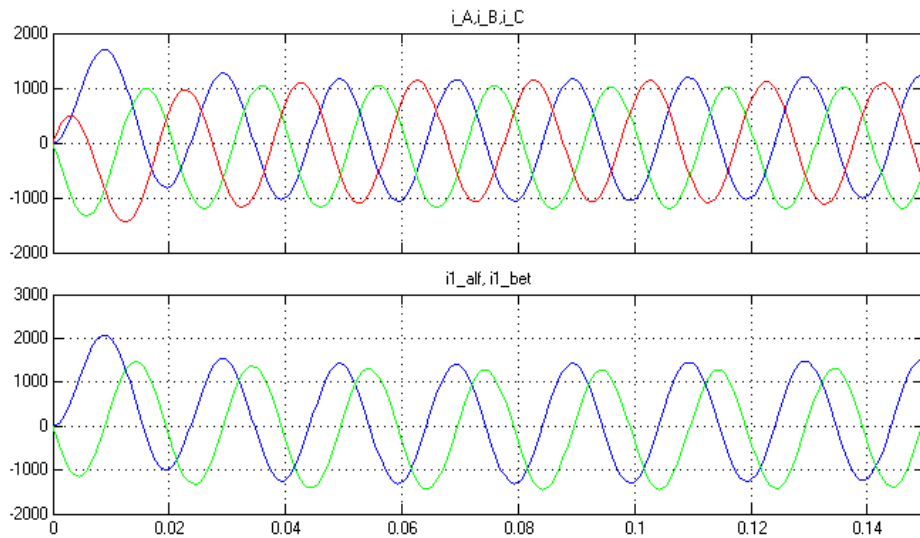


Рис.3.6. Осцилограма 2-х фазних струму статора і 3-х фазних струмів статора насоса.

Підсистема яка реалізовує насосну характеристику:

$$M = M_{CX} + (M_H + M_{CX}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 \quad (3.22)$$

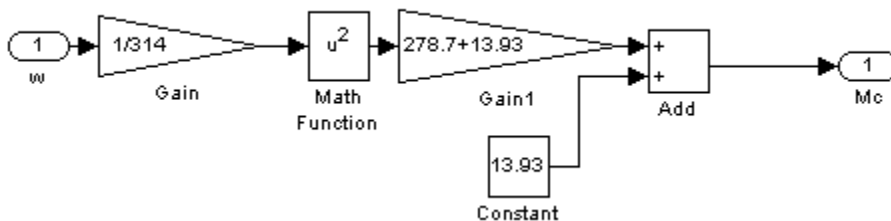


Рис.3.7. Моделювання насосної характеристики.

В результаті маємо графік насосної характеристики:

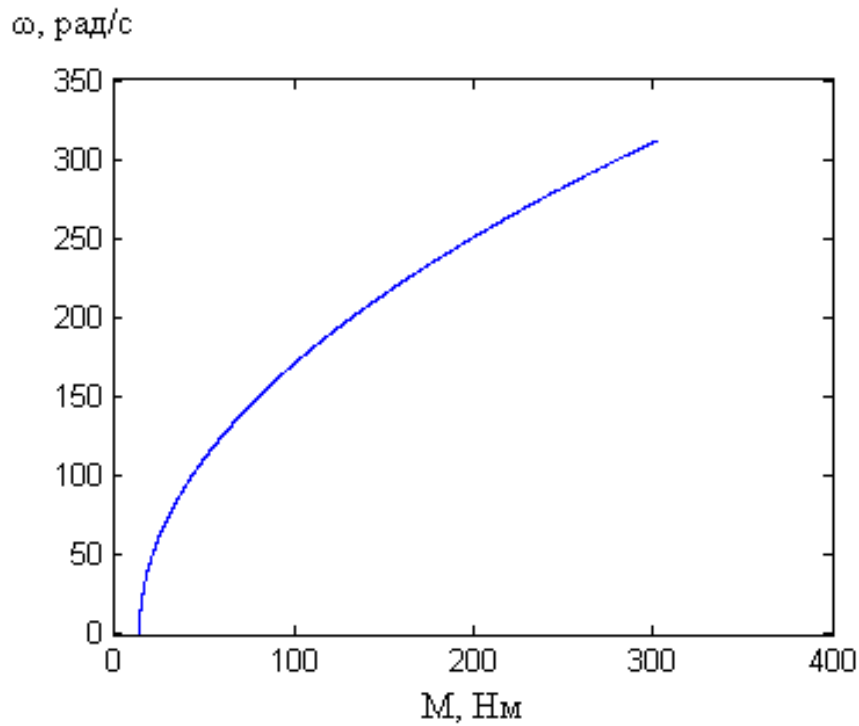


Рис.3.8. Графік характеристики насоса.

Підсистема задатчика тиску:

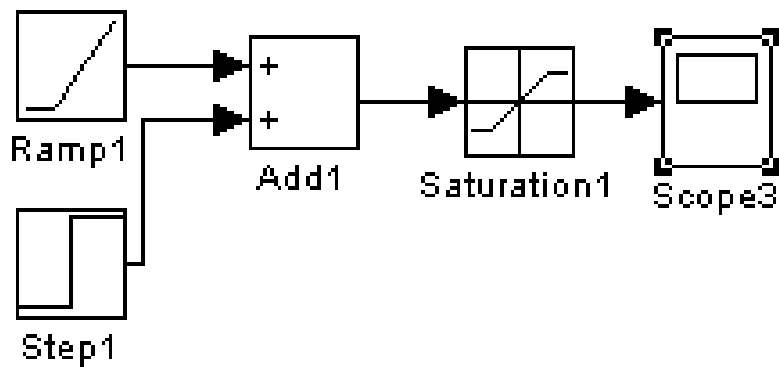


Рис.3.9. Схема завдання тиску.

Використовуючи осцилограф, отримаємо графік задатчика тиску:

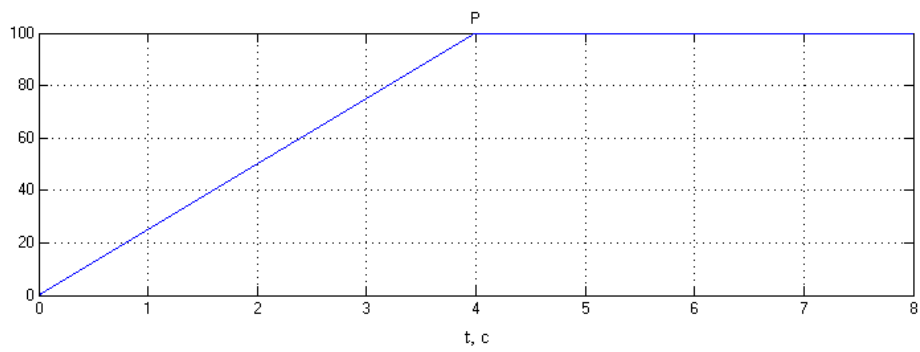


Рис3.10. Графік задатчика тиску.

Підсистема формування напруги залежно від тиску :

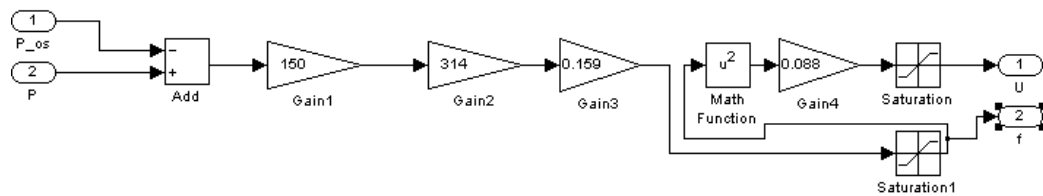


Рис.3.11. Підсистема формування напруги

На вхід блоку подаємо сигнали:

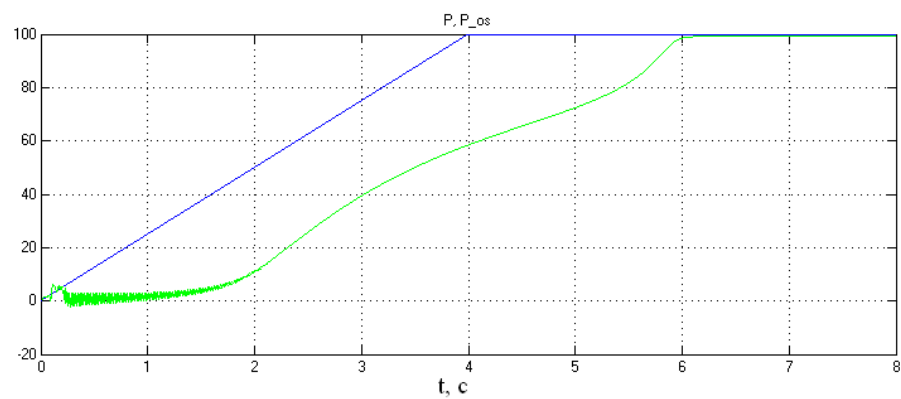


Рис.3.12. Осцилограми тиску в системі і задатчика тиску

В результаті на виході отримуємо формування напруги і частоти:

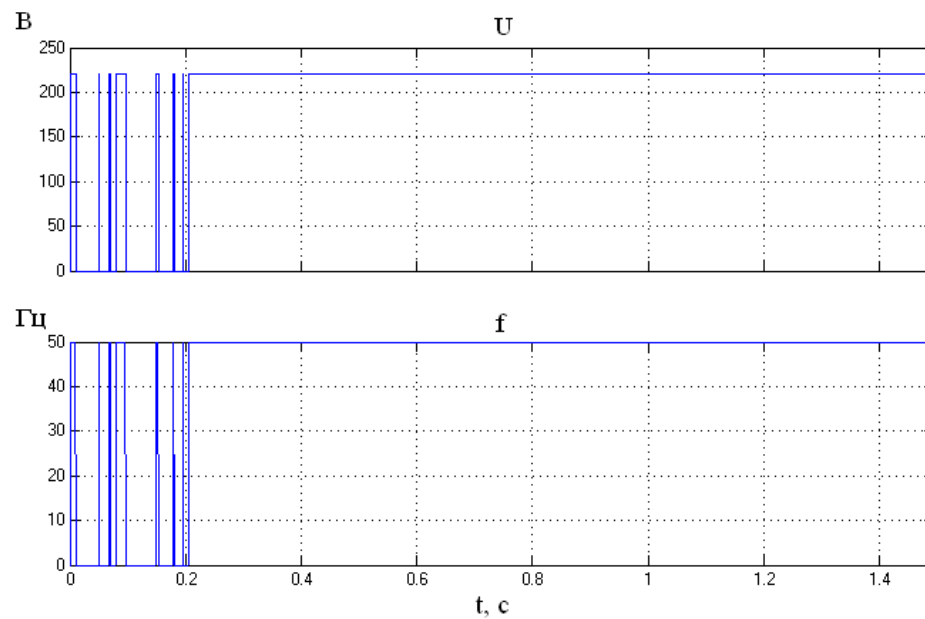


Рис.3.13. Осцилограми напруги і частоти, отримані для перетворювача частоти

Перетворювач частоти:

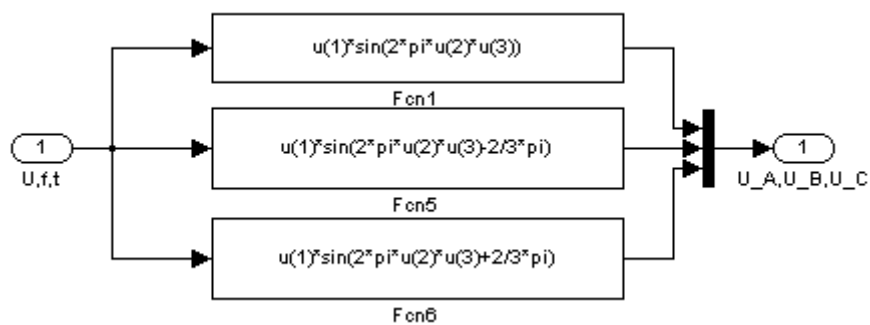


Рис.3.14. Сигнали для перетворювача частоти

Отримуємо 3-х фазну систему напруги на виході перетворювача частоти:

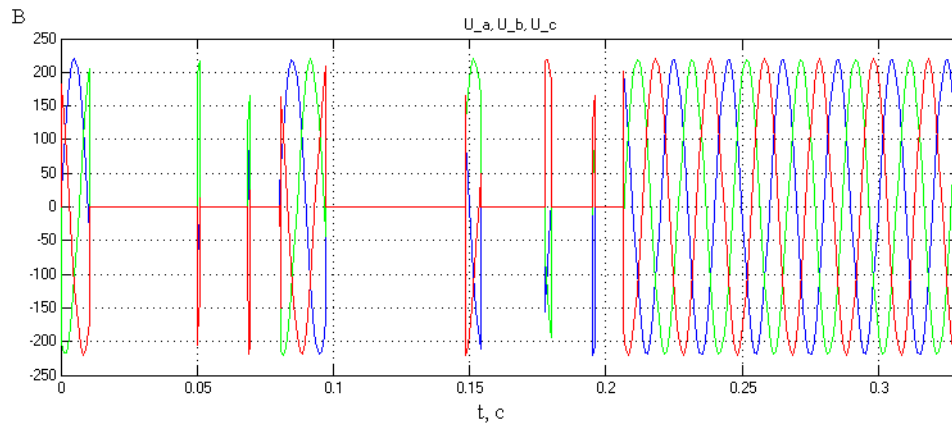


Рис.3.15. Осцилограми напруги отримані перетворювачем частоти

Чотири рівняння системи включають вісім лінійно залежних змінних. Потрібно, за допомогою рівнянь зв'язку струмів і потокозщеплень обмоток статора і ротора усунути дві пари змінних, тобто обрати склад компонентів вектора $\vec{\psi} = [i_{1\alpha}, i_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}]$.

Система потокозщеплень:

$$\begin{cases} \psi_{1\alpha} = L_1 \cdot i_{1\alpha} + L_{12} \cdot i_{2\alpha}, \\ \psi_{1\beta} = L_1 \cdot i_{1\beta} + L_{12} \cdot i_{2\beta}, \\ \psi_{2\alpha} = L_2 \cdot i_{2\alpha} + L_{12} \cdot i_{1\alpha}, \\ \psi_{2\beta} = L_2 \cdot i_{2\beta} + L_{12} \cdot i_{1\beta}; \end{cases} \quad (3.23)$$

З двох останніх рівнянь системи можна виразити струми ротора:

$$\begin{cases} i_{2\alpha} = \frac{1}{L_2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} \cdot i_{1\alpha}, \\ i_{2\beta} = \frac{1}{L_2} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_{12}}{L_2} \cdot i_{1\beta}; \end{cases} \quad (3.24)$$

Отримані вирази підставимо в рівняння для потокозщеплень статора, тобто перші два рівняння:

$$\begin{cases} \psi_{1\alpha} = L_1 i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} \psi_{2\alpha} - \frac{L_{12}^2}{L_2} i_{1\alpha} = \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} \psi_{2\alpha}, \\ \psi_{1\beta} = L_1 i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} \psi_{2\beta} - \frac{L_{12}^2}{L_2} i_{1\beta} = \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} \psi_{2\beta}; \end{cases} \quad (3.25)$$

Позначивши:

$$L_{1\sigma} = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2}, \quad (3.26)$$

Отримаємо вираження для потокозщеплень обмоток статора:

$$\begin{cases} \psi_{1\alpha} = L_{1\sigma} i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} \psi_{2\alpha}, \\ \psi_{1\beta} = L_{1\sigma} i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} \psi_{2\beta}; \end{cases} \quad (3.27)$$

Позначивши:

$$p = \frac{d}{dt}; \quad (3.28)$$

Повний момент:

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_{12}}{L_2} (i_{1\beta} \psi_{2\alpha} - i_{1\alpha} \psi_{2\beta}); \quad (3.29)$$

Розглянемо елементи, що входять до складу підсистем:

Підсистема «EL_MAG_1»:

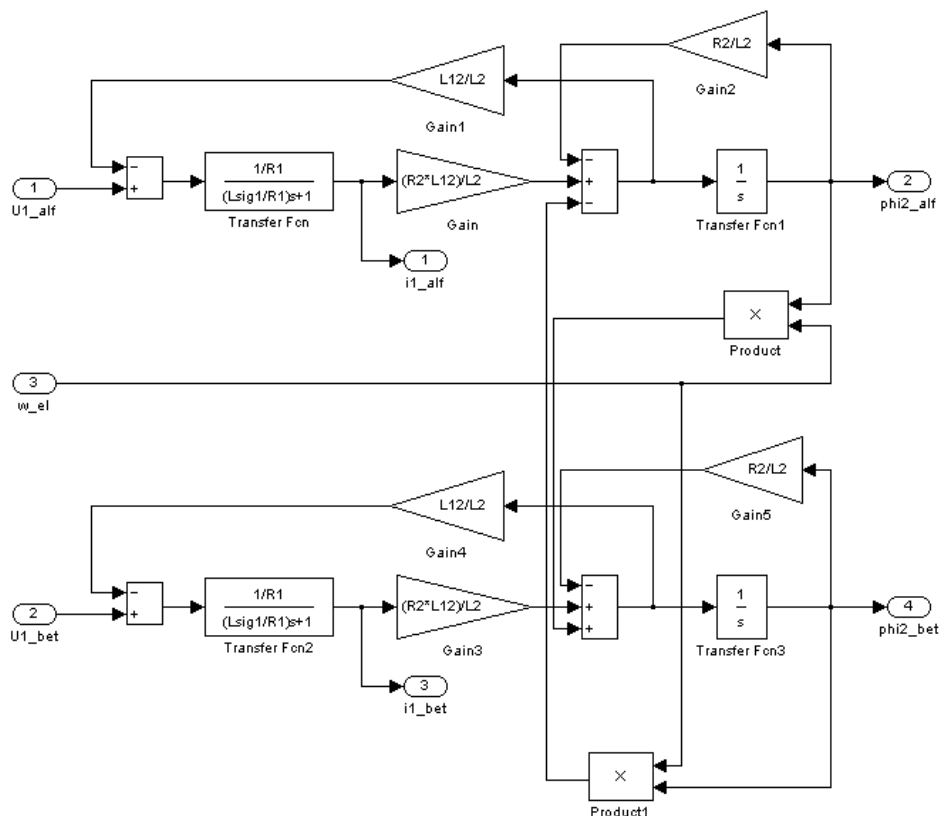


Рис.3.16. Підсистема електромагнітного перетворювача типу EL_MAG_1

Підсистема «EL_MAG_2»:

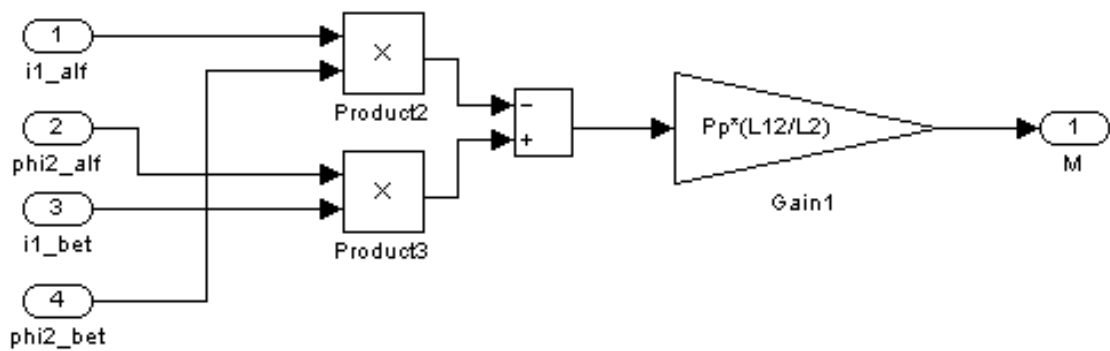


Рис.3.17. Підсистема електромагнітного перетворювача «EL_MAG_2»

Підсистема «Mech»:

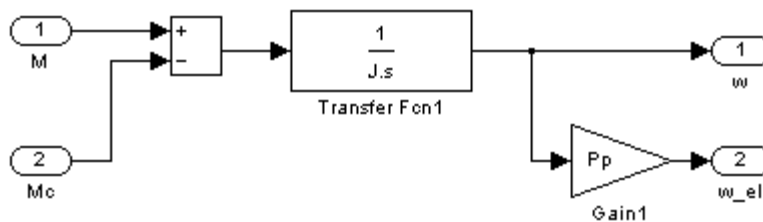


Рис.3.18. Підсистема механічного перетворювача типу «Mech»

Одержуємо модель асинхронного електродвигуна в двофазній системі координат (α, β) , поєднавши три підсистеми разом (EL_MAG_1, EL_MAG_2, Mech),.

3.2.2 Режим роботи насосної станції без використання перетворювача частоти.

Моделювання роботи станції в середовищі Simulink:

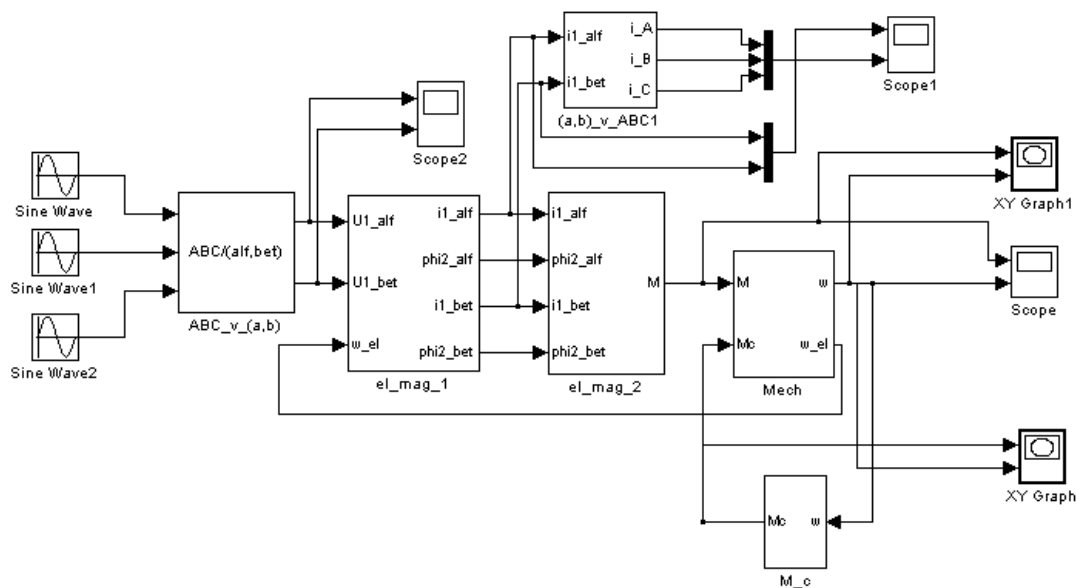


Рис3.19. Схема прямого запуску АД

Отримуємо динамічну характеристику електродвигуна при прямому пуску (без перетворювача частоти):

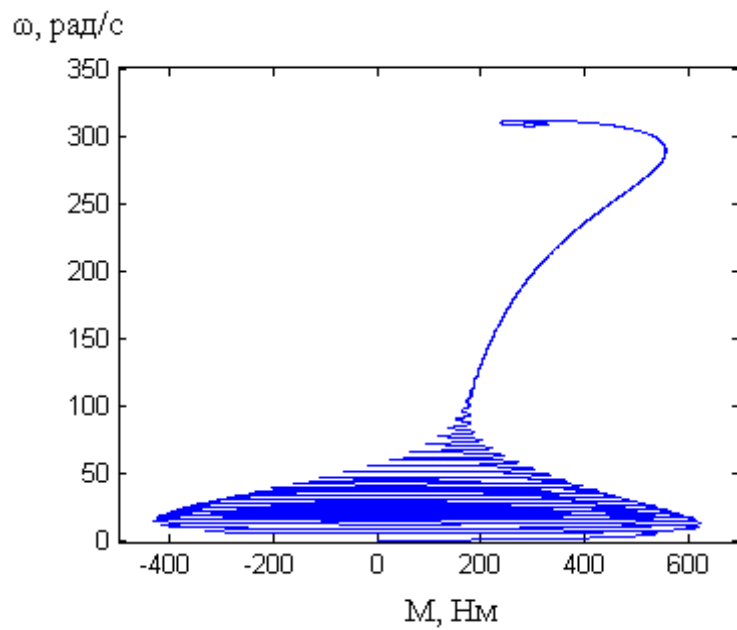


Рис.3.20. Динамічна характеристика

Струми статора електродвигуна:

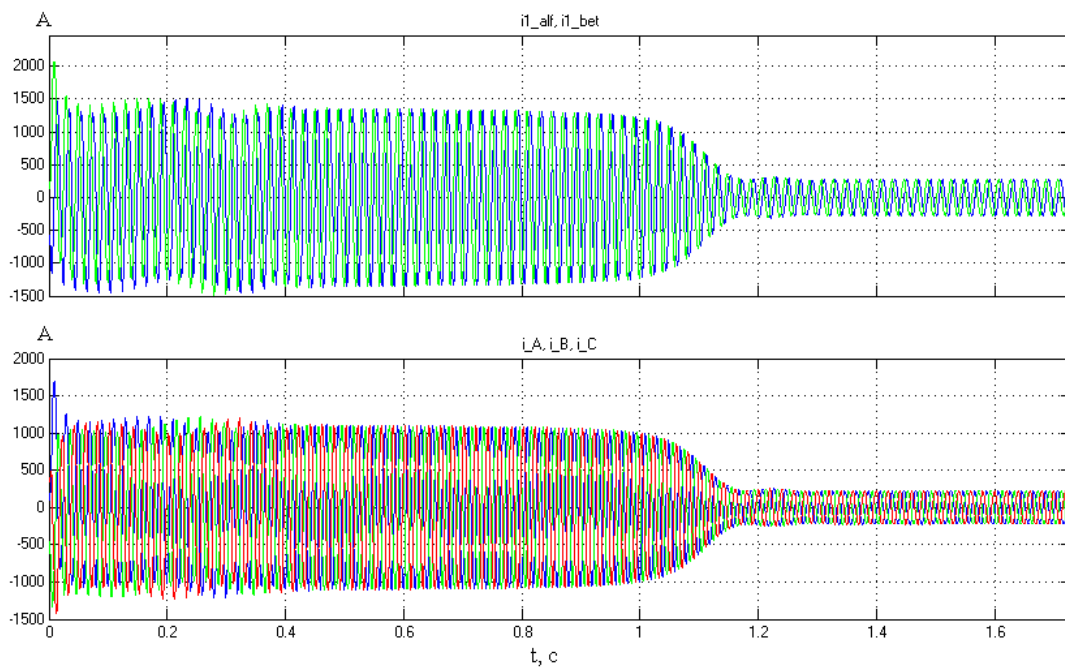


Рис.3.21. Осцилограма струмів статора

Отримуємо графік моменту, моменту опору та швидкості електродвигуна:

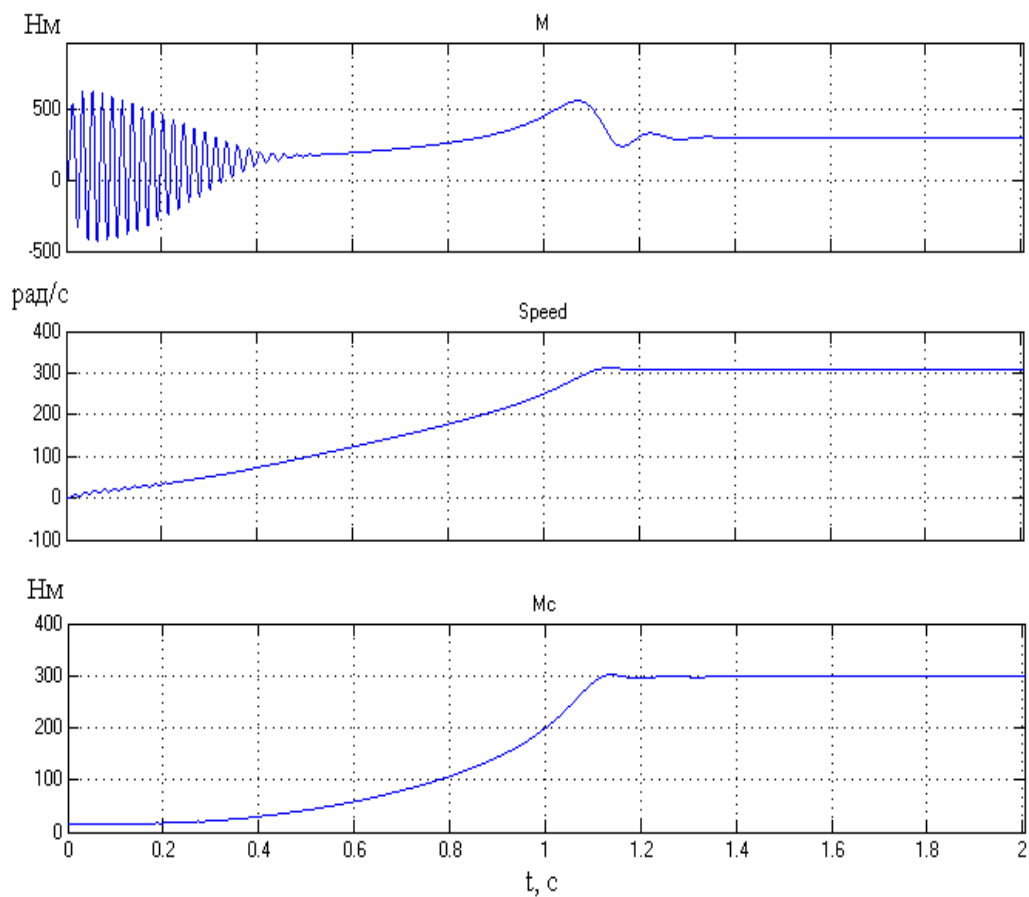


Рис.3.22. Осцилограма моменту, моменту опору і швидкості при прямому пуску.

З'єднавши разом моделі перетворювача частоти і асинхронного двигуна, отримаємо модель керованої насосної станції.

3.2.3 Режим роботи насосної станції з частотним перетворювачем

Змоделюємо в середовищі Simulink насосну станцію з П - регулятором:

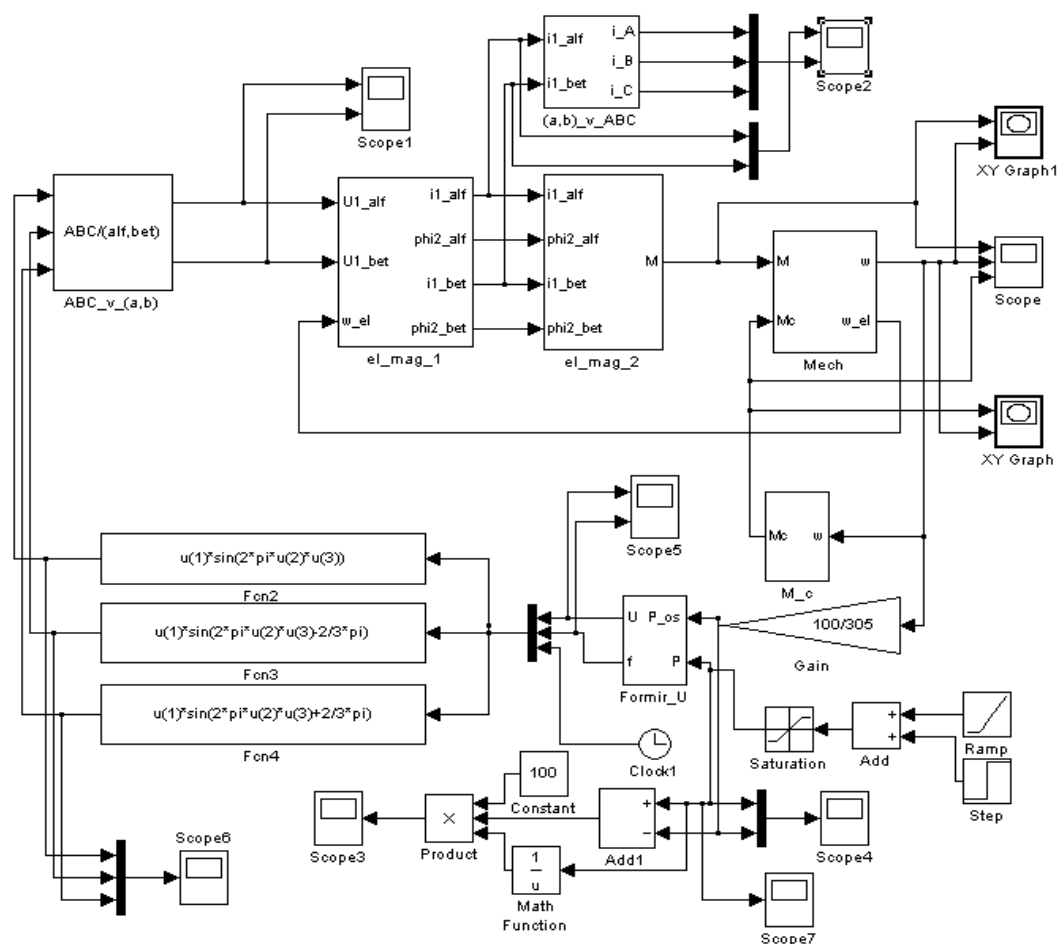


Рис.3.23. Схема пуску АД з ПЧ

Отримано динамічну характеристику електродвигуна (запуск з використанням перетворювачем частоти):

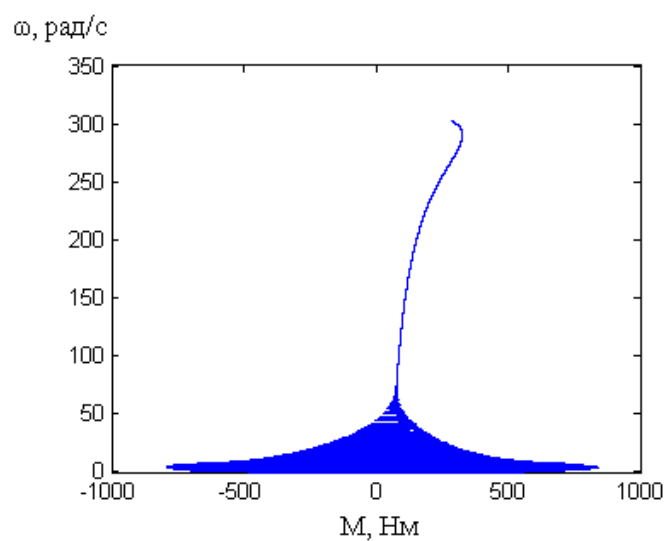


Рис.3.24. Динамічна характеристика АД з П – регулятором

Вигляд струмів статора електродвигуна:

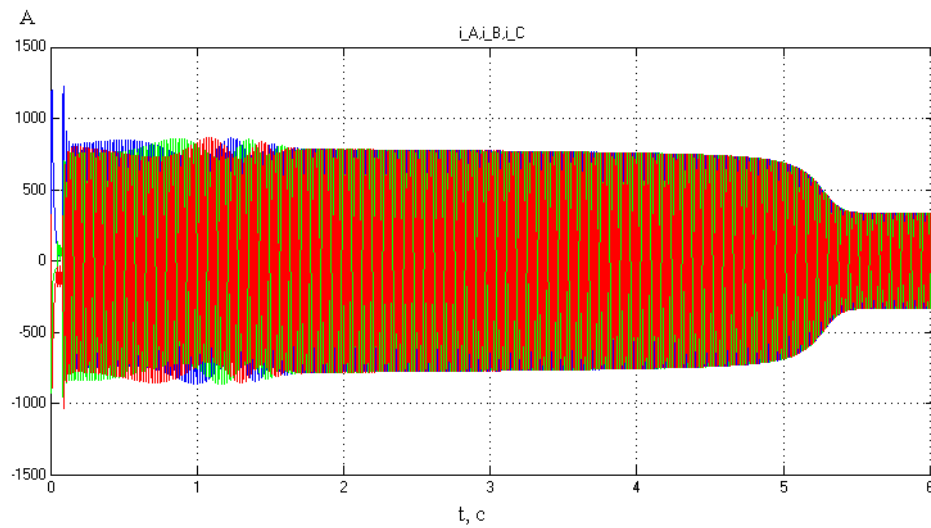


Рис.3.25. Осцилограма струмів статора двигуна.

Вигляд графіку моменту, моменту опору і швидкості двигуна представлено на рисунку:

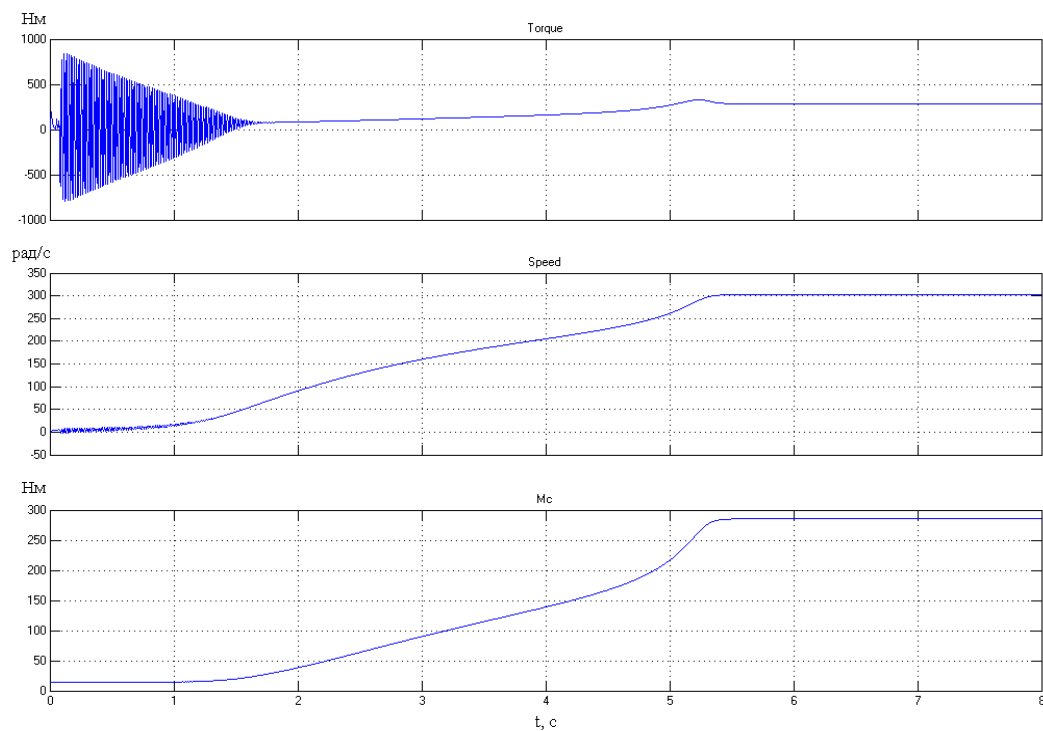


Рис.3.26. Осцилограми моменту, моменту опору і швидкості АД при пуску з ПЧ і П-регулятором

Отримуємо графіки задатчика тиску і тиску в системі з П - регулятором:

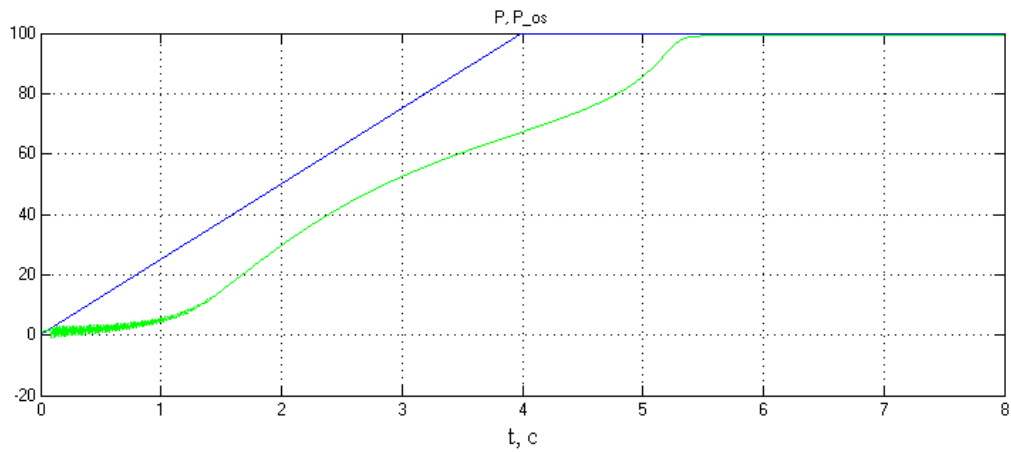


Рис.3.27. Осцилограми задатчика тиску і тиску в системі

При збільшенні рис.3.27 можна розглянути помилку регулювання:

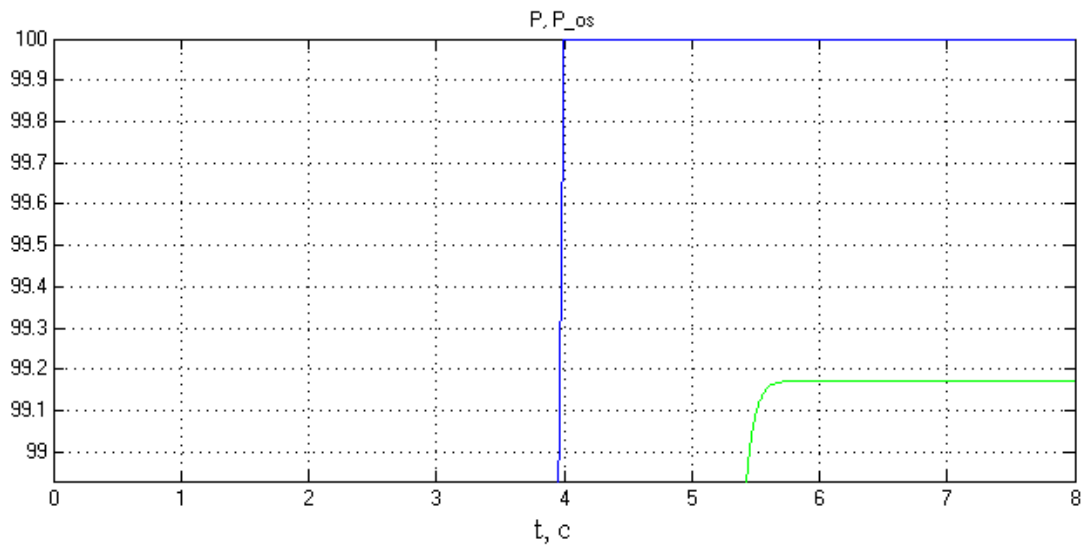


Рис.3.28. Помилка регулювання.

Помилка системи у вигляді графіка представлена нижче:

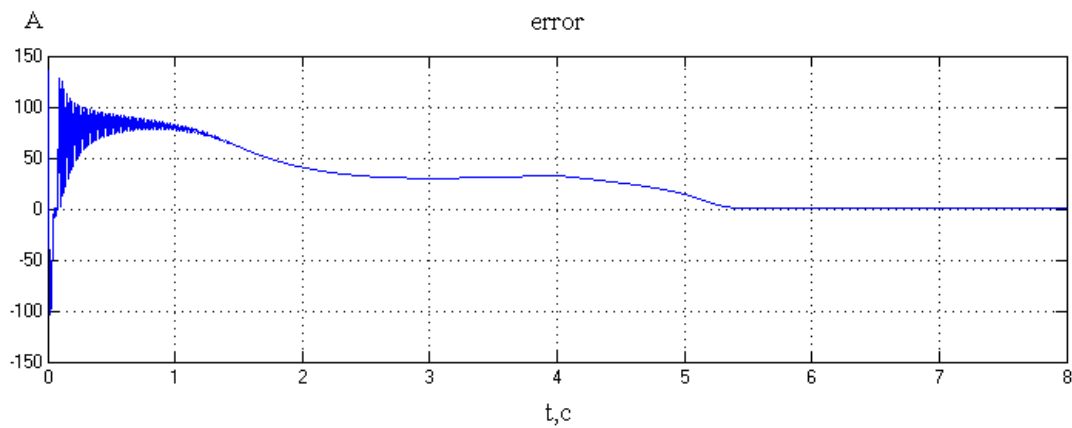


Рис.3.29. Помилка системи у відсотках

Таким чином ми можемо зробити висновок, що система з П – регулятором забезпечує потрібний тиск в системі, що дозволяє підтримувати тиск води на мінімально необхідному рівні ; контролює плавний пуск і гальмування двигунів, що істотно підвищує надійність механічного і електричного устаткування, збільшує термін його служби, і запобігає гідравлічним ударами у водопровідній мережі; підвищує коефіцієнта потужності, оскільки перетворювач частоти практично не споживає реактивну енергію.

3.3. Перехідні процеси системи управління пасажирським ліфтом за допомогою математичної моделі

Для оцінки ефективності впровадження частотно-регульованого електроприводу в ліфтовому господарстві розглянемо перехідні процеси плавного пуску асинхронного двигуна.

3.3.1 Розробка математичної моделі технологічного процесу управління та технологічного обладнання з тиристорними перетворювачами електроприводів.

Моделювання роботи технологічного процесу проводитимемо в середовищі MATLAB Simulink, який має широкі можливості проведення математичного моделювання, утворюючи модель з простих блоків. В середовищі Simulink

можуть міститися блоки, що дозволяють відтворювати візуалізацію процесів моделювання.

Представимо математичний опис процесів в асинхронному електродвигуні :

Математичний опис АД повинен відображати особливості експлуатаційних режимів роботи навантаження моментного ЕП на прикладі випробувального стенду. Окрім цього, надалі дана імітаційна модель досліджується як об'єкт оптимального керування, за допомогою якого виконується структурно-параметрический синтез системи векторного управління АД.

Здійснюючи складання рівнянь електричної рівноваги в обмотках АД за основу береться система рівнянь для трифазної електричної машини та низка припущень, які прийняті в теорії електричних машин змінного струму:

- параметри обмоток всіх фаз приймаються з однаковими значеннями, тобто наявний симетричний режим роботи двигуна;
- магнітне поле електричної машини синусоїдально розподілюється уздовж повітряного зазору;
- приймаємо напругу на виході ПЧ у вигляді синусоїди, навмисно не враховуючи взаємний вплив між асинхронним двигуном і перетворювачем частоти по силовому каналу;
- нехтуються втрати в сталі, які утворюються протіканням вихрових струмів в магнітопроводі електродвигуна та його перемагнічуванням;
- ігнорується насичення магнітного кола АД з причини накладення обмежень на струми статорів;
- ефектом витіснення струмів в провідниках ротора нехтуємо – він незначний із-за того, що частота струмів ротора обмежена робочою ділянкою механічної характеристики при живленні від ПЧ.

Згідно другого закону Кірхгофа і враховуючи наведені вище припущення, можна представити рівняння для ЕДС в обмотках статора і ротора двигуна в наступному вигляді:

$$\begin{cases} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\Psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\Psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\Psi_{SC}}{dt} \end{cases} \quad (3.30)$$

для ланцюгів статора і для ланцюгів ротора

$$\begin{cases} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\Psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\Psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\Psi_{RC}}{dt} \end{cases} \quad (3.31)$$

У наведених системах рівнянь приймаються наступні позначення:

$R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = R_S$ – активні опори фаз статора;

$R_{RA} = R_{RB} = R_{RC} = R_R$ – активні опори фаз ротора;

$U_{SA}, U_{SB}, U_{SC}, U_{RA}, U_{RB}, U_{RC}$ – миттєві фазні напруги статора і ротора;

$I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}, I_{RA}, I_{RB}, I_{RC}$ – миттєві фазні струми в обмотках статора і ротора;

$\Psi_{SA}, \Psi_{SB}, \Psi_{SC}, \Psi_{RA}, \Psi_{RB}, \Psi_{RC}$ – потокозчеплення обмоток статора і ротора.

Для встановлення зв'язку між потокозчепленнями та струмами в обмотках можна скористатися законом Ампера, отримуємо:

$$\begin{cases} \Psi_{SA} = L_{SA} I_{SA} + L_{SASB} I_{SB} + L_{SASC} I_{SC} + L_{SARA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SARC} I_{RC} \\ \Psi_{SB} = L_{SBSA} I_{SA} + L_{SB} I_{SB} + L_{SBSC} I_{SC} + L_{SBR A} I_{RA} + L_{SBRB} I_{RB} + L_{SBR C} I_{RC} \\ \Psi_{SC} = L_{SCSA} I_{SA} + L_{SCSB} I_{SB} + L_{SC} I_{SC} + L_{SCRA} I_{RA} + L_{SCRB} I_{RB} + L_{SCRC} I_{RC} \end{cases} \quad (3.32)$$

для статора та для ротора:

$$\begin{cases} \Psi_{RA} = L_{RASA} I_{SA} + L_{RASB} I_{SB} + L_{RASC} I_{SC} + L_{RA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RARC} I_{RC} \\ \Psi_{RB} = L_{RBSA} I_{SA} + L_{RBSB} I_{SB} + L_{RBSC} I_{SC} + L_{RBRA} I_{RA} + L_{RB} I_{RB} + L_{RBRC} I_{RC} \\ \Psi_{RC} = L_{RCSA} I_{SA} + L_{RCSB} I_{SB} + L_{RCSC} I_{SC} + L_{RCRA} I_{RA} + L_{RCRB} I_{RB} + L_{RC} I_{RC} \end{cases} \quad (3.33)$$

Рівняння потокозчеплень відображають залежність від струмів в кожній обмотці через взаємоіндукцію. У рівняннях (3.32 і 3.33) коефіцієнти L_{SA} , L_{SB} , L_{SC} , L_{RA} , L_{RB} , L_{RC} є власними індуктивностями відповідних обмоток, всі останні - індуктивності між відповідними обмотками.

Пам'ятаючи про те, що системи рівнянь (3.30 - 3.33) пов'язують виключно скалярні величини, вирази для електромагнітного моменту можна представити в наступному вигляді:

$$M = \frac{z_p}{\sqrt{3}} [I_{RA}(\Psi_{RB} - \Psi_{RC}) + I_{RB}(\Psi_{RC} - \Psi_{RA}) + I_{RC}(\Psi_{RA} - \Psi_{RB})] \quad (3.34)$$

де z_p це число пар полюсів розглядуваного АД.

Згідно другого закону Ньютона можна представити рівняння для руху і рівноваги моментів на валу двигуна:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{нагр} \quad (3.35)$$

де J – момент інерції на валу двигуна, ω_r – кутова частота обертання ротора, M – момент, який розвивається двигуном та $M_{нав}$ – момент, який прикладений до валу двигуна зі сторони навантаження.

Первинно АД є трифазною електричним двигуном з неявнополюсним ротором. Досліджуючи режими роботи АД в складі навантаження

моментного ЕП та сукупність прийнятих вище припущень можна допустити можливість використання для еквівалентної двофазної моделі математичного опису.

Спрощуючи математичний опис АД виявилось відповідним використання методу просторового вектора, який дозволяє істотно спростити і скоротити наведену вище систему рівнянь; метод дозволяє пов'язати рівняння (3.30 - 3.35) в одну систему з векторними змінними стану. Принцип методу полягає в математичному перетворенні миттєвих значень симетричних трифазних змінних стану (напруги, струми, потокозчеплення) таким чином, щоб вони були представлені у вигляді одного просторового вектора.

Система рівнянь з векторними змінними стану у випадку довільної орієнтації системи координат виглядає наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{sx} I_{sy} - \Psi_{sy} I_{sx}) \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{нагр} \end{array} \right. \quad (3.36)$$

де U_s , U_r , I_s , I_r , Ψ_s та Ψ_r - двоелементні вектори напруги, струмів і потокозчеплень, представлені в довільно орієнтованій ортогональній (двофазній) системі координат у формі складових по координатних осях. Змінна величина ω_r потрібна для задання довільної частоти обертання системи координат. Допоміжна матрична константа j існує для «перевороту» компонентів векторних змінних і спрощує форму представлення системи рівнянь.

Розкриємо зміст просторових векторів, та отримаємо наступне:

$$\begin{aligned}
U_s &= \begin{bmatrix} U_{sx} \\ U_{sy} \end{bmatrix}, U_r = \begin{bmatrix} U_{rx} \\ U_{ry} \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_{sx} \\ I_{sy} \end{bmatrix}, I_r = \begin{bmatrix} I_{rx} \\ I_{ry} \end{bmatrix}, \\
\Psi_s &= \begin{bmatrix} \Psi_{sx} \\ \Psi_{sy} \end{bmatrix}, \Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_{rx} \\ \Psi_{ry} \end{bmatrix}, j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.37}$$

При вирішенні завдань розробки систем управління для АД потрібно розглядати його імітаційну модель з точки зору об'єкту оптимального управління. Згідно теорії систем управління асинхронними електроприводами у випадках моделювання АД має місце унікальний принцип орієнтації координатної системи по вектору потокозчеплення ротора. В цьому випадку імітаційна модель АД являє собою схожість із структурною схемою машин постійного струму, де можливе роздільне керування магнітним станом і моментом на валу електродвигуна.

Умова орієнтації математично виражається таким чином:

$$\psi_{ry} = 0; \frac{d\psi_{ry}}{dt} = 0; \psi_{rx} = \psi_r. \tag{3.38}$$

Рівняння, які характеризують АД в координатній системі з примусовою орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sx}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sx} - r_e i_{sx} + k_r a_r \psi_r + l_e \omega_k i_{sy}) \\ \frac{di_{sy}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sy} - r_e i_{sy} - k_r \omega_r \psi_r - l_e \omega_k i_{sx}) \\ \frac{d\psi_r}{dt} = r_r k_r i_{sx} - a_r \psi_r \\ 0 = r_r k_r i_{sy} - \beta_k \psi_r \\ m = k_m \psi_r i_{sy} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_{назр}) \end{array} \right. \quad (3.39)$$

В системі β_k є ковзанням координатної системи, а ω_k є відповідно швидкістю її обертання. Ці параметри визначаються відповідно до наступних виразів:

$$\beta_k = \frac{r_r k_r i_{sy}}{\psi_r}; \quad \omega_k = \omega_r + \beta_k. \quad (3.40)$$

В системі рівнянь змінні, які мають індекси «х» і «у» відповідають компонентам просторового вектора у системі координат з орієнтацією по вектору потокозчеплень ротора ψ_r . Використовуючи правила створення і перетворення структурних схем, які прийняті в теорії автоматичного управління, можна представити систему рівнянь як структурну схему. На рис.3.30 представлена структурна схема імітаційної моделі АД в координатній системі з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора ψ_r .

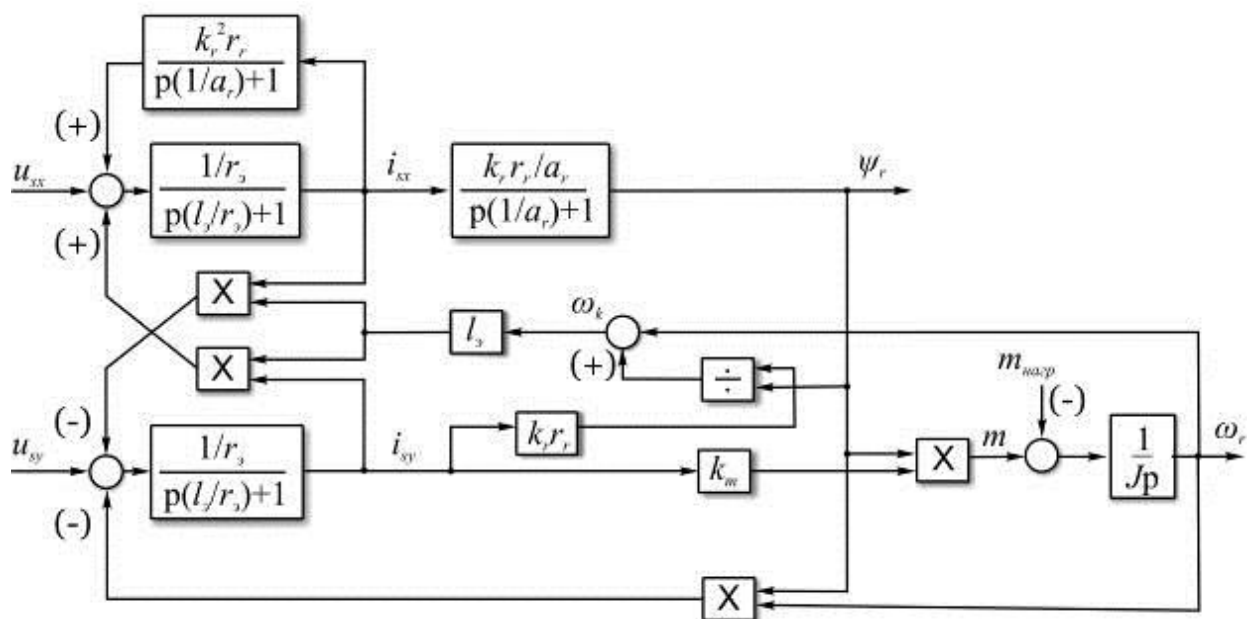


Рис.3.30. Структурна схема імітаційної моделі асинхронного двигуна в координатній системі з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора ψ_r

Модель АД, представлена на рис.3.30 використовується для реалізації і розрахунку в прикладних програмних продуктах, які підтримують об'єктно-структурне моделювання систем (Simulink-Matlab, Windora та ін). Для аналізу і перевірки адекватності представленої моделі АД зручно впровадити її реалізацію в середовищі Simulink-Matlab. В цій системі симетрична трифазна напруга, представлена у відносних одиницях піддаються перетворенню Кларка і знаходяться у вигляді компонентів просторового вектора напруги $u_{s\alpha}$ та $u_{s\beta}$ на входи координатного перетворювача Парка-Горєва. Формули для координатного перетворення Парка-Горєва, які дозволяють перейти від стаціонарної системи координат до обертаючої, представлені нижче:

$$\begin{aligned} u_{sx} &= u_{s\alpha} \cos \theta_k + u_{s\beta} \sin \theta_k, \\ u_{sy} &= -u_{s\alpha} \sin \theta_k + u_{s\beta} \cos \theta_k. \end{aligned} \quad (3.41)$$

де $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ - складові просторового вектора напруги статора двигуна u_s , наведені в стаціонарній координатній системі;

u_{sx} , u_{sy} - складові вектора напруги статора u_s , представлені в обертаючій системі координат;

θ_k - кут повороту обертаючої координатної системи, (кут орієнтації).

Критерій θ_k зв'язаний з кутовою швидкістю обертання системи координат

ω_k завдяки наступному виразу:

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_k. \quad (3.42)$$

Графічно перетворення Парка-Горєва ілюструється на рис.3.31 :

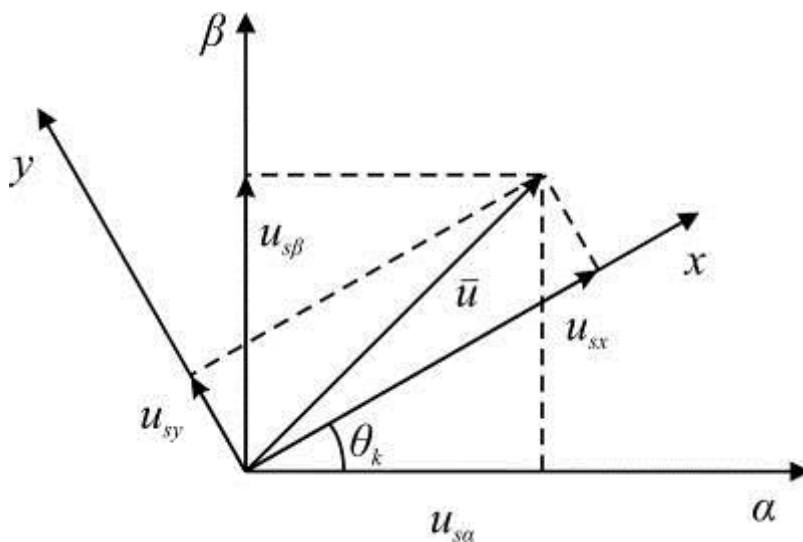


Рис.3.31 Графік перетворень Парка-Горєва для зв'язку між системою координат, що обертається і стаціонарною.

Координатний перетворювач Парка-Горєва орієнтований разом з системою координат представленої імітаційної моделі асинхронного двигуна. З цієї причини на входи моделі по напрузі u_{sx} та u_{sy} поступають компоненти просторового вектора напруги, представленої в обертаючій системі координат.

3.3.2 Структура і параметричний синтез регуляторів системи управління.

Синтез регуляторів здійснювався із стандартної методики налаштування контурів згідно модульному або симетричному оптимуму. Будемо наводити лише передавальні функції регуляторів і короткий опис контурів.

Розглянемо контур струму.

Налаштування контуру струму проводилося на модульний оптимум за допомогою ПІ-регулятора.

Передавальна функція ПІ-регулювальника струму

$$W_{PT}(p) = k_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} = 6,341 \cdot \frac{16,37 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{16,37 \cdot 10^{-3} \cdot p} \quad (3.43)$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму:

$$k_{PT} = \frac{T_{\Theta} \cdot R_{\Theta}}{k_{И} \cdot k_T \cdot a_T \cdot (T_{\mu\Pi} + T_{\mu T0})} = \frac{16,37 \cdot 10^{-3} \cdot 4,023}{18,3 \cdot 0,717 \cdot 2 \cdot (0,0625 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 10^{-3})} = 6,341, \quad (3.44)$$

де

$$k_T = \frac{U_{3TMAX}}{I_{1YMAXC}} = \frac{10}{13,95} = 0,717 \text{ В/А}, \quad (3.45)$$

коефіцієнт ОС по струму.

$a_T = 2$ - коефіцієнт оптимізації.

Постійна часу регулювальника струму:

$$T_{PT} = T_{\Theta} = 16,37 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

Налаштування контуру подібне налаштуванню на модульний оптимум (МО) системи 2-го порядку. Контур являється астатичною системою 1-го порядку по управлінню.

Контур потокозчеплення.

При проведенні оптимізації контуру потокозчеплення внутрішній оптимізований замкнутий контур струму представляється усіченою передавальною функцією 1-го порядку.

Представимо передавальну функція ПІ-регулятора потокозчеплення :

$$W(p)_{P\Psi} = k_{P\Psi} \cdot \frac{T_{P\Psi} \cdot p + 1}{T_{P\Psi} \cdot p} = 101,48 \cdot \frac{0,445 \cdot p + 1}{0,445 \cdot p}. \quad (3.46)$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора потокозчеплення визначаються по виразах :

$$k_{P\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi} \cdot \frac{1}{a_\Psi \cdot (T_T + T_{\mu\Psi 0})} = \frac{0,445 \cdot 0,717}{0,55 \cdot 2,55} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,79 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3})} = 40,615 \quad (3.47)$$

де

$$k_\Psi = \frac{U_{3\Psi \text{МАКС}}}{\Psi_H} = \frac{10}{3,91} = 2,55 \text{ В/Вб}; \quad U_{3\Psi \text{МАКС}} = 10\text{В}; \quad (3.48)$$

$a_\Psi = 2$ - коефіцієнт оптимізації.

Налаштування контура подібне налаштуванню на модульний оптимум системи другого порядку. Цей контур являється астатичною системою регулювання першого порядку по керуванню і надає нульову сталу помилку $\Delta\Psi_{\text{уст}} = 0$.

Розглянемо контур швидкості.

Проводячи оптимізацію контуру швидкості, представимо внутрішній оптимізований замкнутий контур струму усіченою передавальною функцією 1-го порядку.

Такий вигляд має передавальна функція ПІ-регулятора:

$$W(p)_{PC} = k_{PC} \cdot \frac{T_{PC} \cdot p + 1}{T_{PC} \cdot p} = 226,25 \cdot \frac{11 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{11 \cdot 10^{-3} \cdot p}. \quad (3.49)$$

Коефіцієнт посилення і постійна часу регулювальника швидкості визначаються по виразах:

$$k_{PC} = \frac{J_{\dot{Y}} \cdot k_T}{\psi_{2X} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_C} \cdot \frac{1}{a_C \cdot (T_T + T_{\mu C0})} = \frac{61,82 \cdot 0,717}{3,91 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,55}{0,589} \cdot 2 \cdot 1,6} \times \\ \times \frac{1}{2 \cdot (0,79 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3})} = 226,25 \quad (3.50)$$

Оптимізований контур при відробітку ступінчастих дій, що управляють, забезпечує високу швидкодію при перерегулюванні в спільному випадку більше 43%. Принцип налаштування контуру без фільтрів на вході близький до налаштування на СО.

З метою обмеження перерегулювання на рівні біля 8,1 % на вході контура швидкості включено два однакові фільтри.

Розглянемо нелінійну систему.

Подальше моделювання проводиться з урахуванням основної нелінійності - насичення регуляторів, обмежена напруга перетворювача.

Нелінійна система для регулювання швидкості вимагає наступні критерії:

Постійна швидкість обертання дорівнює $\omega_{уст} = 6,25 \text{ рад/с}$, це відповідає лінійному руху кабіни зі швидкістю $v_{уст} = 1 \text{ м/с}$.

Обмеження прискорення. Значення прискорення має бути . $a \leq 2 \text{ м/с}$

Щоб виконати висунуті вимоги потрібен задатчик інтенсивності, з допомогою якого встановлюється час для розгону до робочої швидкості.

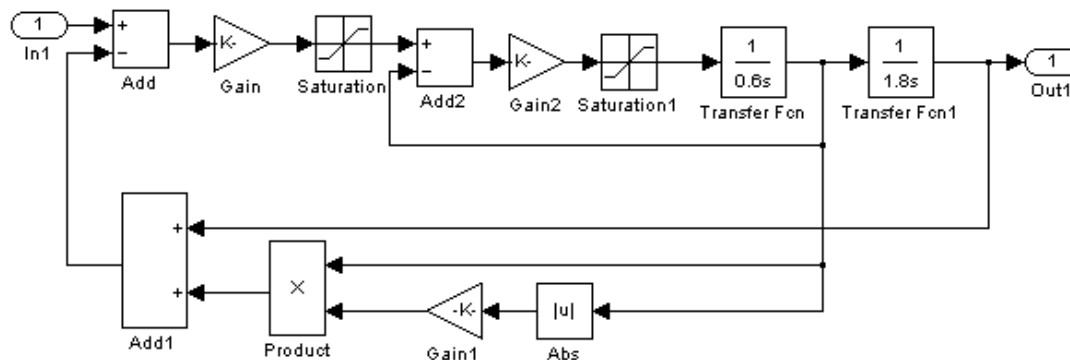


Рис.3.32 - Імітаційна модель S-подібного задатчика інтенсивності в середовищі Simulink

Припустимо час розгону 2,4 с.

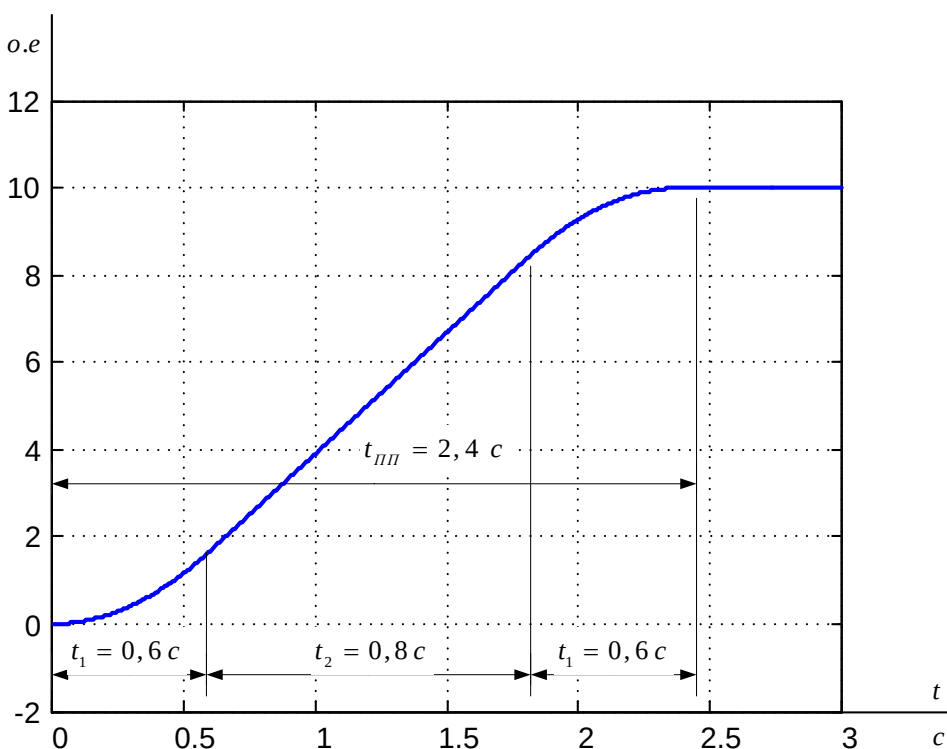


Рис.3.33. Перехідна характеристика S-подібного задатчика інтенсивності.

Представлена на рис.3.30 імітаційну модель РЕП в середі Simulink. Перехідні характеристики отримані при моделюванні представлені на рис.3.34.

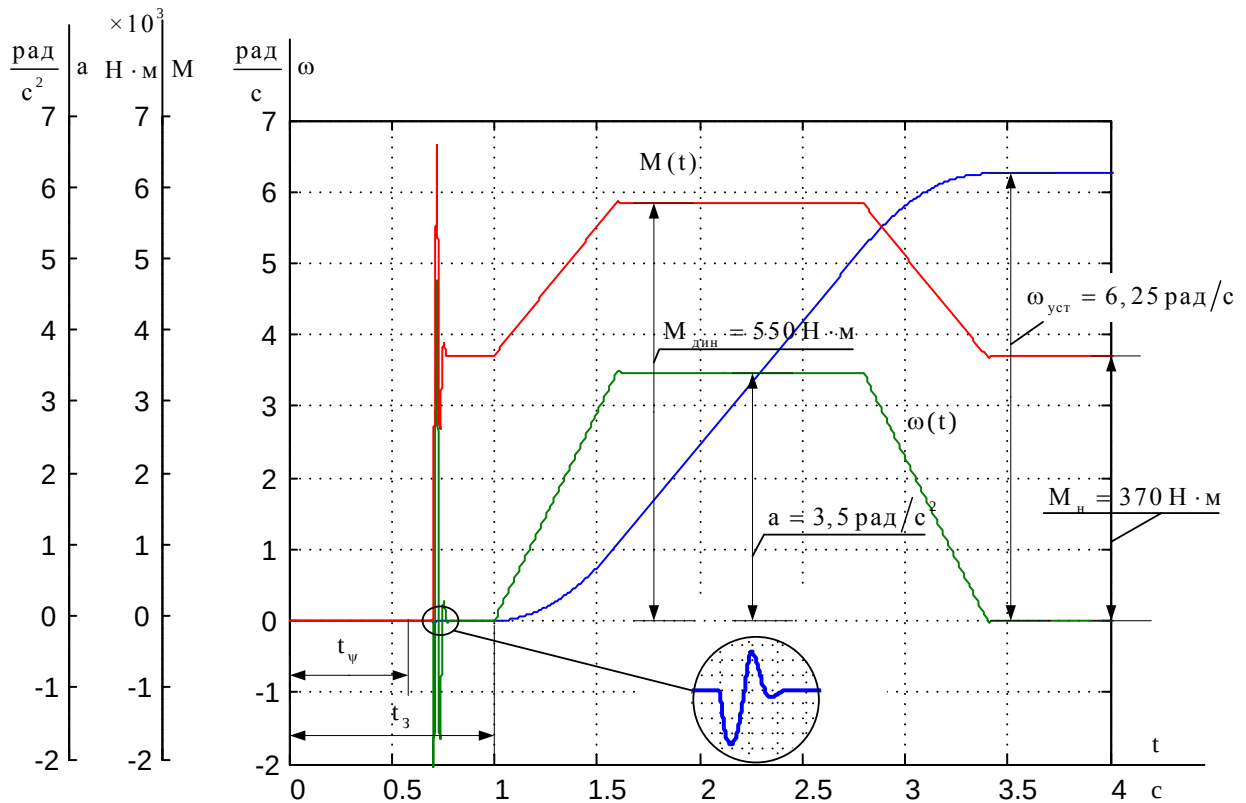


Рис.3.34. Перехідні характеристики нелінійної системи РЕП $M(t)$, $a(t)$, $\omega(t)$
У САУ СЕП при застосуванні пропорційного регулятора в позиційних режимах проходить перерегулювання, а це критично для управління позиціонуванням кабіною ліфта. Для оптимізації перехідних процесів використовують положення регулятора з нелінійною характеристикою. У простій схемі другого порядку з обмеженням моменту (струму) двигуна ця характеристика має вигляд параболи.

Параболічний регулятор.

Характеристику регулятора положення представляємо у вигляді шматково-лінійної функції, що має параболічний вигляд:

$$\Delta\phi_{\tau} = \frac{k_M}{2 \cdot k_c^2 \cdot \left[\frac{\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{макс}}}{n} \right]} \cdot U_{\text{рп}}^2, \quad (3.51)$$

Визначимо точки лінійної ділянки характеристики $U_{\text{рп}} = f(\Delta\phi)$ регулятора положення з вираження:

$$U_{\text{рп}} = K_{\text{рп}} \cdot \Delta\phi, \quad (3.52)$$

де $K_{\text{рп}} = 0,45$ - коефіцієнт посилення регулятора положення.

Вирішуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} U_{\text{рп}} = K_{\text{рп}} \cdot \Delta\phi_{\tau} \\ U_{\text{рп}} = \pm \sqrt{\frac{\Delta\phi_{\tau}}{k_M} \cdot \frac{2 \cdot k_c^2}{n} \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{макс}}} \end{cases} \quad (3.53)$$

де $n = 4$, знаходимо точку перетину, в якій лінійна характеристика регулятора набуває характер плавного зростання :

$$U_{\text{рп}} = 0.86$$

$$\Delta\phi_{\tau} = 15.3$$

Характеристика $U_{pn} = f(\Delta\varphi_T)$

-10	-8	6	-4	-2	-0,855	0,855	2	4	6	8	10
-1566,4	-1002,5	-563,9	-250,6	-62,7	-11,5	11,5	62,7	250,6	563,9	1002,5	1566,4

Розглянемо відпрацювання завдання на пересування на відстань п'ятого поверху в одномасовій механічній системі. Враховуючи, що відстань між поверхами дорівнює 3 метри, завдання складе 15000. Одержані перехідні характеристики представлені на рис. 3.3.5.

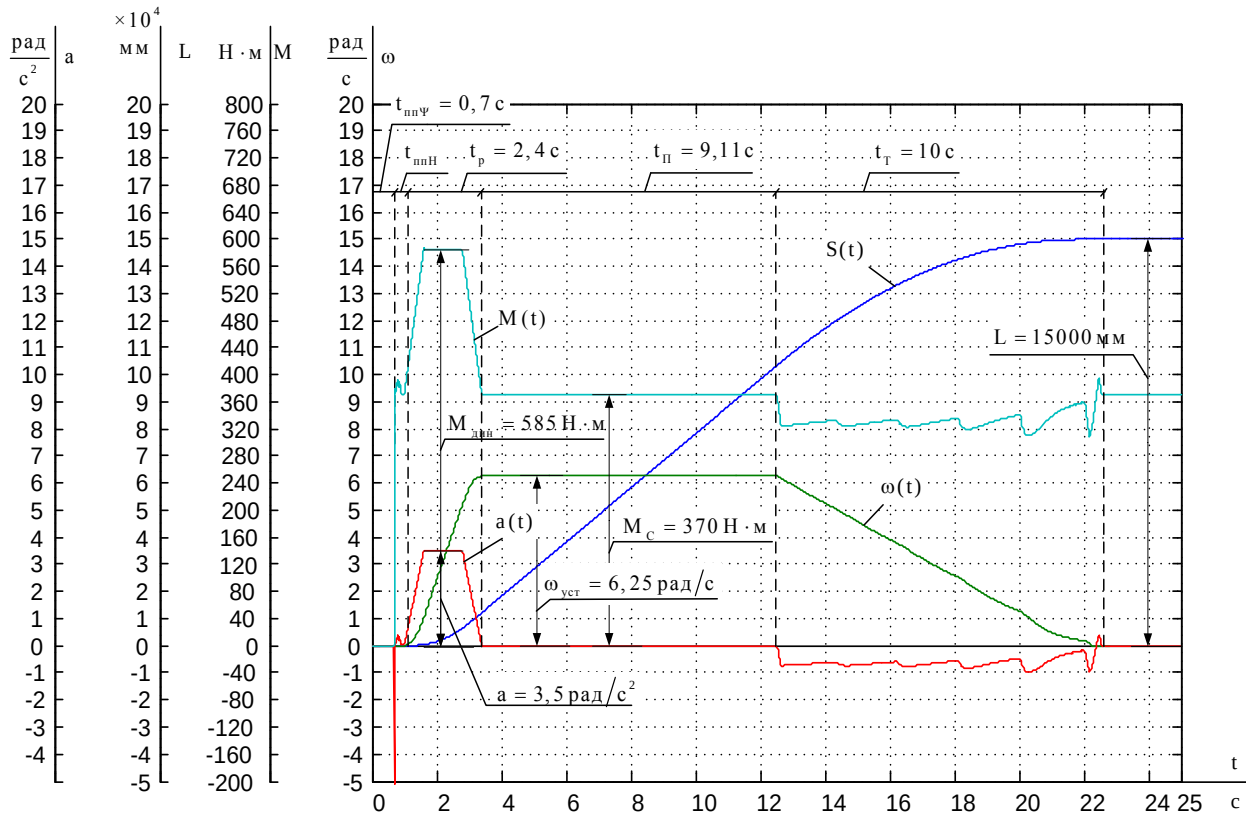


Рис.3.35. Перехідні характеристики нелінійної системи СЕП

 $M(t)$, $a(t)$, $\omega(t)$, $L(t)$

Затримання швидкості гальмування пояснюється роботою параболічного регулятора, а також проведення корекції інтегрального насичення у нелінійних регуляторах. В цей же час перехідний процес по положенню здійснюється без перерегулювання та статична помилка дорівнює нулю.

Плавні перехідні процеси, які забезпечуються частотно-регульованим приводом, викликають значне зниження динамічних навантажень в елементах кінематичного кола електроприводу, що дозволяє значно підвищити надійність та довговічність експлуатації механічного устаткування ліфта, усуває потребу частої заміни редуктора, канатоведучого шківів, гальмівних колодок, електричного двигуна та елементів підвіски противаги при роботі ліфта.

ГЛАВА 4. ВИБІР СИСТЕМ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ДЛЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ПРОЦЕСІВ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ

4.1. Системи водопостачання.

Традиційна схема холодного водопостачання виглядає таким чином. Насосна станція першого підйому, розташована біля водоймища, подає воду в резервуар станції водопідготовки, розташованої інколи на відстані десятків кілометрів від водоймища. На станції вода минає повний цикл очищення і насосною станцією другого підйому подається по водопровідній мережі безпосередньо споживачам або в резервуар, розташований на пануючій висоті, звідки вже самотіс поступає до споживачів. На кожній з цих станцій, як правило, встановлюється декілька насосів, у тому числі резервних для забезпечення безперебійного водопостачання з двигунами потужністю в сотні кіловат. Споживання води має чітко виражені добові і тижневі цикли, тому необхідне регулювання подачі води відповідно до її витрати. До недавнього часу регулювання здійснювалося двома способами: дискретним - зміною кількості працюючих насосів; плавною, - за допомогою ручної або електрифікованої заслінки. Крім того, для зменшення витоків води натиск на станціях другого підйому вночі зменшують, прикриваючи заслінку.

Водопровідна мережа є дуже розгалуженою і протяжною, тому споживачі, розташовані достатньо далеко або широко по відношенню до насосної станції другого підйому, часто відчують нестачу натиску води. У цих випадках використовують підкачуючі насосні станції невеликої потужності, наприклад квартальні насосні станції, розраховані на групу будинків, які піднімають тиск в мережі до необхідного рівня. Ці станції не мають постійного обслуговуючого персоналу, і тиск на їх виході лише час від часу підстроюється за допомогою заслінок. При цьому тиск у водопровідній мережі вночі із-за зниження витрати може збільшуватися до неприпустимого значення, а в години найбільшої витрати (ранок і вечір) падати до надмірно низького.

В даний час очевидним вирішенням проблем в системах водопостачання є використання частотно-регульованих асинхронних електроприводів. Як

приклад визначення економічної ефективності частотного регулювання насосів в порівнянні з дросельним регулюванням в таблиці. 4.1 приведені результати розрахунку потужності і споживаної енергії електроприводом насоса з номінальною подачею води 180 м³/ч і номінальним натиском 40 м при разном її витраті. У таблиці. 5.1 приведені підсумкові цифри витрати електроенергії за рік, порівнюючи які, стає очевидним, що економія енергії при переході до частотного регулювання складе порядка 63 %.

Розглянемо декілька проектів модернізації насосних станцій.

Таблица 4.1

Залежність витрати електроенергії при подачі води від способу регулювання насоса

Подача води, м ³ /год	Тривалість роботи насосів	Спосіб регулювання насосів							
		частотний				дросельний			
		Напір стовба води, м	потужність насосів, кВт	ККД, %	Витрати електро- енергії, кВт	Напір стовба води, м	потужність насосів, кВт	ККД, %	Витрати електро- енергії, кВт
180	500	40,0	23,4	84	11700	40	23,4	84	11 700
150	1000	30,8	15,2	83	15 200	45	22,7	81	22 700
120	2500	22,4	8,9	82	22 300	49	21,95	73	54 900
90	2500	16,0	4,8	81	12 100	53	21,3	61	53 300
Простий	1000	11,2	2,5	74	2500	57	21,7	43	21 700
30	500	8,8	1,4	51	700	60	18,2	27	9100
Всього за рік	8000				64 500				173 400

*Насосна станція другого підйому для водопостачання
невеликого міста*

Насосний агрегат подає воду з резервуару, в який вона потрапляє після очищення, у водопровідну мережу міста. До складу насосної станції входять чотири насоси з асинхронними двигунами потужністю 200 кВт кожен. Постійно в роботі знаходиться один насос. Тиск (натиск), який необхідно підтримувати в мережі, складає 45 м, вночі тиск знижується до 30 м. Регулювання тиску здійснювалося оперативним обслуговуючим персоналом зміною положення заслінки. Після установки перетворювача частоти, до якого можуть по черзі підключатися два двигуни з чотирьох, тиск в мережі регулюється автоматично вбудованим в ППЧ ПІД-регулятором по сигналу завдання, який коректується обслуговуючим персоналом, і сигналу зворотного зв'язку з датчика тиску, встановленого на напірному трубопроводі. В результаті такої модернізації удалося чіткіше підтримувати необхідний тиск у водопровідній мережі. В результаті модернізації удалося також понизити споживання електроенергії: контрольні виміри протягом місяця до і після модернізації показали, що витрата енергії на насосній станції скоротилася більш ніж в два рази. На порядок зменшилося споживання реактивної енергії, істотно лагіднів процес пуску насоса як для живлячої електромережі, так і для водопровідної мережі, знизився шум від працюючого агрегату і його знос із-за зменшення середньої швидкості приблизно на 1/3, знизилася аварійність водопровідної мережі, покращали умови роботи обслуговуючого персоналу. Експлуатація перетворювача частоти протягом п'яти років показала його високу надійність і ефективність.

*Насосна станція другого підйому для холодного водопостачання
одного з районів крупного міста*

Об'єктом модернізації була насосна станція холодного водопостачання, призначена для подачі питної води на промислові підприємства і в житлові будинки. Насосна станція складається з чотирьох насосних агрегатів типа 1Д800-56 з асинхронними приводними двигунами типа 4АМН315У3S1, $P_{ном}$ що мають $=200$ кВт, $n_{ном} = 1470$ об/хв $I_{ном} = 363$ А. Одночасно працюють два насоси, два інших знаходяться в резерві. Регулювання натиску на вихідному колекторі здійснювалося електричними заслінками по сигналах контактних манометрів.

Для попередньої оцінки ефективності застосування частотного регулювання електроприводів насосів виконані виміри напруги, струмів, активної і реактивної потужностей, коефіцієнта потужності одного з двох працюючих двигунів з використанням аналізатора електроспоживання AR5, а також набуті почасових значень тиску на вихідному колекторі і подачі води протягом доби з 16.00 14 грудня до 16.00 15 грудня (робочі дні). Насоси працюють паралельно, тому завантаження їх двигунів приблизно однакове. Результати проведених вимірів зведені в таблиці. 4.2.

Проведені виміри показують, що насосні агрегати недовантажені по потужності, особливо вночі. Споживання реактивної енергії значне; коефіцієнт потужності складає приблизно 0,8. Тиск на вихідному колекторі протягом доби змінюється від 40 до 50 м, а подача води приблизно в 2 рази. Регулювання тиску в даний час здійснюється засувками на вихідному колекторі, це дозволяє передбачити, що значна частка електроенергії витрачається непродуктивно

Таблиця 4.2

Залежність потужності, споживаної двигуном насоса, і витрати води від часу доби

Час доби	Струм. А	Активна потужність одного двигуна, кВт	Реактивна потужність одного двигуна, кВАр -ч	Тиск на виході, м	Витрата води, м ³ /ч
16.00	265	159	104	46	1150
17.00	266	160	106	44	1150
18.00	279	168	107	41	1150
19.00	274	165	110	42	1150
20.00	270	161	102	42	1400
21.00	268	160	102	42	1200
22.00	273	163	102	45	1200
23.00	267	159	102	47	1200
0.00	251	147	100	49	1000
1.00	241	140	98	50	1000
2.00	234	135	96	50	800
3.00	232	134	96	50	600
4.00	195	104	69	50	600
5.00	191	99	66	49	600
6.00	213	111	74	44	800
7.00	276	163	108	45	1150
8.00	251	155	103	47	1000
9.00	265	146	97	44	1000
10.00	177	101	67	44	600
11.00	234	133	88	48	900
12.00	227	130	86	46	900
13.00	202	116	77	46	800
14.00	199	108	72	46	750
15.00	181	104	69	47	700

Таблиця 4.3

Розрахункова економія потужності, споживаної насосними агрегатами при різних способах регулювання їх роботи

Час доби	Активна потужність двох двигунів при дросельному регулюванні, кВт	Потужність, необхідна при частотному регулюванні, кВт	Розрахункова економія споживаної потужності, кВт
16.00	159	238,05	79,95
17.00	160	227,7	92,3
18.00	168	212,175	123,825
19.00	165	217,35	112,65
20.00	161	264,6	57,4
21.00	160	226,8	93,2
22.00	163	243	83
23.00	159	253,8	64,2
0.00	147	220,5	73,5
1.00	140	225	55
2.00	135	180	90
3.00	134	135	133
4.00	104	135	73
5.00	99	132,3	65,7
6.00	111	158,4	63,6
7.00	163	232,875	93,125
8.00	155	211,5	98,5
9.00	146	198	94
10.00	101	118,8	83,2
11.00	133	194,4	71,6
12.00	130	-186,3	-73,7
13.00	116	-165,6	-66,4
14.00	108	-155,25	-60,75
15.00	104	-148,05	-59,95

Віднімаючи з даних другої колонки таблиці. 4.3 дані третьої колонки, можна знайти потужність, що непродуктивно витрачається, тобто передбачувану економію потужності при впровадженні частотно-регульованого електроприводу насоса. Вважаючи зміну потужності протягом 1 ч за незначну, за даними таблиці. 4.3 можна обчислити добове споживання енергії при дросельному і частотному регулюванні. Воно складе

відповідно 6 642 і 4680 кВт-ч. Очевидно, що добова економія електроенергії при частотному регулюванні складе 1962 кВт-ч, а протягом року економія енергії досягне 716 130 кВт-ч. Природно, ця цифра є орієнтуванням, оскільки не враховано збільшення витрати води у вихідні дні, а також сезонні зміни її витрати.

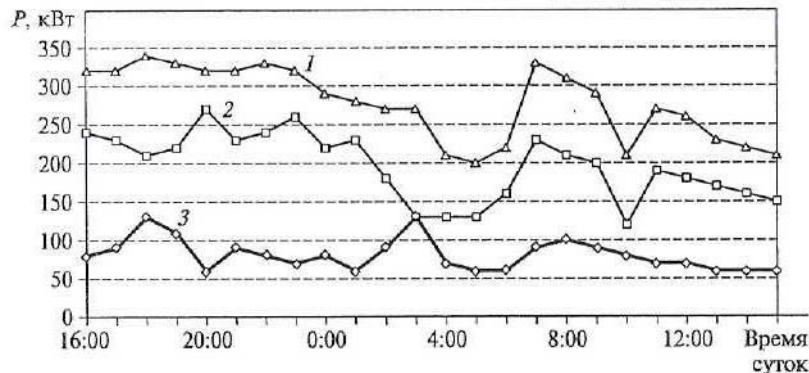


Рис. 4.1. Результати розрахунку передбачуваної економії потужності, споживаної насосами:

1 - активна потужність двох двигунів при дросельному регулюванні; 2 - потужність, необхідна при частотному регулюванні; 3 - розрахункова економія потужності

Таким чином, обстеження показало, що існуюча схема електрообладнання насосної станції не забезпечує точну підтримку натиску на необхідному рівні, вживане регулювання натиску дроселюванням відноситься до енергетично неефективних способів, прямий пуск двигунів насосів викликає значні пускові струми та призводить до гідравлічних ударів в водопровідній системі.

Метою модернізації є переведення електричної частки насосної станції на півень сучасної елементної бази з плавним та енергетично ефективним регулюванням частоти обертання приводів насосів, тиску та подачі води насосним устаткуванням в потрібних межах, утворення сучасної і гнучкої

системи автоматизації, контролю, захисту, сигналізації та діагностики.

Модернізація електроустаткування насосної станції включає наступні основні технічні рішення:

- установку перетворювача частоти для плавного пуску та регулювання частоти обертів насосного агрегату;
- установку пристрою м'якого пуску для ненаголошеного запуску нерегульованих електроприводів насосів;
- установку програмованого контролера для регулювання тиску і подачі води, управління електроустаткуванням насосної станції, автоматизації її роботи і діагностики електроустаткування;
- модернізацію пульта управління і сигналізації.

При цьому після модернізації зберігається можливість роботи насосної станції по існуючій схемі, з живленням двигунів від електричної мережі безпосередньо.

Перехід на частотне керування приводами насосів надає наступні переваги:

- безступінчатє плавне регулювання швидкості двигунів насосів у всьому діапазоні, що дозволяє підтримувати натиск води на мінімально потрібному рівні;
- контрольований плавний розгін та гальмування двигунів значно покращують надійність механічного та електричного устаткування, підвищують термін його служби;
- збільшення коефіцієнта потужності, тому що перетворювач частоти практично не споживає реактивну енергію;
- економію електроенергії, пов'язану з переходом на енергетично ефективне управління і відмовою від регулювання натиску води шляхом дроселювання;
- широкі можливості програмного налаштування параметрів електроприводу, контролю роботи, діагностики несправностей

Установка пристрою м'якого пуску забезпечує наступне:

- виключення гідравлічних ударів у водопровідній мережі і відсутність

значних пускових струмів за рахунок плавного контрольованого пуску електродвигунів;

- контроль і діагностику насосного агрегату при роботі від пристрою м'якого пуску.

Установка програмованого контролера забезпечує наступне:

- можливість відмови від релейно-контакторної схеми управління і, отже, підвищення надійності схеми;

- розширення функцій і гнучкість управління, тобто можливість програмного перенастроювання алгоритму роботи, реалізацію складних законів управління, зокрема регулювання натиску або подачі насосів по вибору, програмна зміна натиску протягом доби, автоматичне перемикання насосів і т.д.;

- контроль і діагностику несправностей;

- можливість управління перетворювачем частоти і пристроєм м'якого пуску по послідовному інтерфейсу, тобто забезпечення повного контролю роботи силового електроустаткування.

На рис. 4.2 приведена спрощена однолінійна схема електроустаткування насосної станції, на якій передбачена можливість живлення насосів від двох різних фідерів, що забезпечує надійнішу роботу станції. Двигуни *M1* і *M3* харчуються від перетворювача частоти, а *M2* і *M4* - від пристрою м'якого пуску. Всі чотири двигуни при необхідності можуть харчуватися безпосередньо від мережі. Слід зауважити, що для виключення аварійних ситуацій в схемі має бути передбачена механічне або електричне блокування одномоментного вмикання контакторів *KM1* и *KM3*, *KM2* и *KM4*, *KM5* и *KM7*, *KM6* и *KM8*.

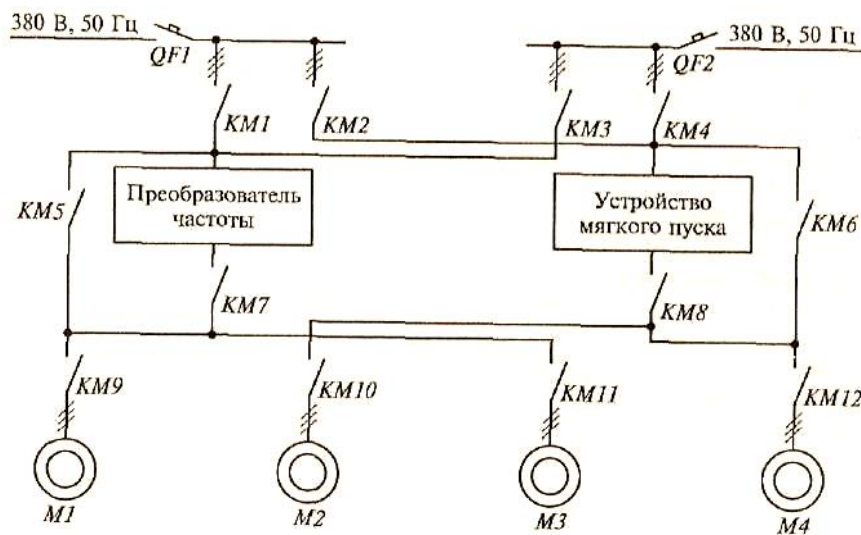


Рис. 4.2. Спрощена однолінійна схема електроустаткування насосної станції

Робота схеми відбувається таким чином. Спочатку запускається двигун *M1* або *M3* від перетворювача частоти. Якщо під дією регулювальника тиску він виходить на номінальну частоту обертання, то запускається двигун *M2* або *M4* від пристрою м'якого пуску. Регулювальник тиску при цьому поступово знижує частоту обертання двигуна *M1* або *M3*, підтримуючи необхідний тиск в системі. Після розгону двигуна *M2* або *M4* він може безпосередньо підключатися до мережі через контактор *KM6*. Таким чином, постійно в роботі знаходяться два насоси, один - на номінальній частоті обертання, інший - в регульованому режимі з живленням від перетворювача частоти. Вночі, коли витрата води значно знижується, в роботі залишається один двигун, що живиться від перетворювача частоти.

Підкачувальна насосна станція

Підкачувальна насосна станція забезпечує необхідний тиск води в житловому кварталі з декількома висотними будинками. На насосній станції встановлено три однакові насосні агрегати, один з них знаходиться в роботі, два інших - в резерві.

Параметри асинхронного двигуна насоса: тип АМ 16052ЖУ2, $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$, $\eta = 88 \%$, $I_{\text{ном}} = 29 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 2910 \text{ об/хв}$, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$.

Параметри насоса: тип приводу КМ100-80С, подача $100 \text{ м}^3/\text{год}$, натиск 32 м , $n_{\text{ном}} = 2900 \text{ об/хв}$.

Засувка на напірному трубопроводі дозволяє приблизно встановити необхідний тиск, рівний 70 м . На мал. 4.3, *а* представлена діаграма добової зміни тиску при нерегульованому електроприводі насоса, на якій добре видно, що дійсний тиск змінюється від 70 м вдень до 98 м вночі, коли витрата води значно знижується. Це приводить до додаткових витоків і непродуктивної витрати енергії. При цьому заслінка на напірному трубопроводі повністю відкрита, тиск достатній точно утримується на заданому рівні, а швидкість двигуна насоса протягом доби коливається в діапазоні $0,4 \dots 0,8$ номінального значення.

Для оцінки ефективності частотного регулювання електроприводу насоса були виконані виміри витрати води і електроенергії протягом тижня з регульованим і нерегульованим електроприводами. Дані по виконаних вимірах приведені в таблиці. 4.4. Їх аналіз показує, що середньодобова економія води при роботі регульованого електроприводу:

$$E_{\text{в(ср.д)}} = 1253,1 - 940,4 = 312,7 \text{ м}^3 \text{ або } 24,95\% \quad (4.1)$$

а середньодобова економія електроенергії

$$E_{\text{е(ср.д)}} = 307,4 - 182,86 = 124,54 \text{ кВт} \cdot \text{год або } 40,5\% \quad (4.2)$$

Для визначення річного економічного ефекту від впровадження регульованого асинхронного електроприводу розрахуємо річну економію води :

$$E_{\text{в.р.}} = E_{\text{в(ср.д)}} \cdot 365 = 312,7 \cdot 365 = 114135,5 \text{ м}^3 \quad (4.3)$$

електроенергії :

$$E_{\text{е.р.}} = E_{\text{е(ср.д)}} \cdot 365 = 124,54 \cdot 365 = 45457,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.4)$$

Знаючи вартість подачі 1 м³ води (k_1), 1 кВт·год електроенергії (k_2) і вартість каналізації 1 м³ води (k_3), можна розрахувати загальну річну економію по формулі:

$$E_{\Sigma} = k_1 E_{в.р.} + k_2 E_{е.р.} + k_3 E_{в.р.} + \dots \quad (4.5)$$

Відзначимо, що третій доданок в отриманій формулі відображає зниження витрат на повторне очищення води із-за зниження її витоків (економії води) при впровадженні регульованого електроприводу.

Знаючи вартість устаткування і робіт по впровадженню частотно-регульованого електроприводу, можна розрахувати термін окупності такої реконструкції. Зазвичай для таких об'єктів, як що розгледів вище, він складає від напівроку до двох років, причому структура економії річних витрат така: 13... 15 % - економія енергії; 63...64% - економія від зниження витрати води; 21...24 % - економія від зниження витрат на каналізацію води. Енергетична складова економії виявляється не такою великою в порівнянні з ефектом від зниження витрати води. Це є характерним саме для підкачувальних насосних станцій, де на відміну від крупніших насосних станцій зазвичай не передбачено ручне або автоматичне регулювання натиску.

Особливістю підкачувальних насосних станцій є те, що на них тривалий час працює один насос, а останні знаходяться в резерві і догляд за ними непостійний, із-за чого при необхідності їх запуск може супроводжуватися певними проблемами, наприклад заклинюванням, неприпустимо великим моментом навантаження і так далі Тому насоси необхідно періодично перемикаєти. За наявності програмованого контролера ця процедура не представляє складності. Контролер програмується таким чином, що з певною періодичністю (доба або декілька діб) відбувається відключення працюючого насоса і плавне за допомогою ППЧ включення іншого. Таким чином удається підтримувати в робочому стані всі насоси станції. Якщо який-небудь з насосів виходить з ладу, наприклад не запускається, ППЧ сигналізує про це і надалі цей насос виключається з циклу роботи до тих

пір, поки не буде відремонтований.

Таблиця 4.4

Залежність витрати енергії від типа електроприводу насосної станції

День, час добы	Покази лічильників		Витрата за період замірів		Середньодобова витрата	
	води, м³	<u>електро- енергії, кВт·год</u>	води, м³	<u>електро- енергії, кВт·год</u>	води, м³	<u>електро- енергії, кВт·год</u>
При використанні регульованого електропривода						
1-й день, 19.00	399213	154100	6583	1280	940.4	182.86
8-й день, 19.00	405796	155380				
При використанні нерегульованого електропривода						
1-й день, 19.00	405796	155380	8772	2140	1253.1	307.4
8-й день, 19.00	414568	157532				

Відмітимо, що в розрахунок річній економії не увійшов економічний ефект, пов'язаний з скороченням аварійності водопровідної мережі за рахунок зниження і стабілізації тиску води на необхідному рівні і виключення гідравлічних ударів при плавному пуску регульованого електроприводу.

4.2 Системи теплопостачання

Районні опалювальні установки забезпечують гарячою водою і опалюванням житлові будинки, виробничі і інші приміщення. Циркуляція води в системі опалювання забезпечується циркуляційними насосами. Опалювальні установки зазвичай розраховуються так, щоб забезпечити

споживачів теплом і гарячою водою в найхолоднішу пору року. Проте велику частку часу опалювальні установки працюють з навантаженням, значно меншим максимальним, наприклад влітку вони використовуються тільки для гарячого водопостачання, тобто на мінімумі продуктивності. Разом з тим відомо, що об'єм води, який повинні подати в опалювальну систему циркуляційні насоси, зменшується не пропорційно зниженню потреби в теплі, а швидше. Так, при зменшенні потреби в теплі на 50 % об'єм перекачуваної води повинен зменшуватися на 75 %. Очевидно, що дросельне регулювання подачі гарячої води циркуляційними насосами в цьому випадку виявляється надзвичайно не вигідним.

Для заповнення витрати гарячої води в систему повинна поступати певна кількість холодної води із зовнішніх джерел. Це здійснюється підживлювальними насосами, які повинні забезпечувати подачу такої ж кількості води, яка було витрачено споживачами. Оскільки споживання гарячої води протягом доби сильно міняється, то подачу підживлювальних насосів регулюють заслінкою, що так само не економічно, як і на прикладах насосних станцій холодного водопостачання, що розглядали вище.

Більшість опалювальних установок для підігрівання води до потрібної температури використовують казани, паливом для яких служить газ або мазут. Для подачі повітря в зону горіння зазвичай використовують вентилятори, а для видалення продуктів горіння - дымососи. Оскільки продуктивність опалювальної установки міняється в широких межах, то і кількість повітря, що подається вентилятором, і кількість відпрацьованих газів мінятиметься. Для регулювання подачі вентилятора і дымососа відповідно до потреби зазвичай використовують направляючі апарати або шибери, що не є енергетично ефективним. Розглянемо у зв'язку з цим декілька прикладів.

Одним з елементів технологічної модернізації є підживлювальні насоси котельного цеху, який забезпечує опалювання і гаряче водопостачання

промислових підприємств та житлових будинків. У котельному цеху встановлено три підживлювальних насосних агрегати типа ДЗ20-50, що мають натиск 50 м, витрата 320 м³/ч, ККД 76%, з асинхронними приводними двигунами типа 4АМН225М4УЗ ($P_{ном} = 75$ кВт, $n_{ном} = 1470$ об/хв, $I_{ном} = 141$ А, КПД = 92,5%). Постійно працює один насос, а другий, допоміжний, вмикається в години пік (2 - 3 рази на тиждень на декілька годинників), третій знаходиться в резерві. Влітку працює тільки один насос. Регулювання натиску на вихідному колекторі проводиться за допомогою електрифікованих засувки по сигналам манометрів.

Як довело проведення обстеження, існуюча схема електрообладнання підживлювальних насосів не надає достатню точність підтримування натиску на необхідному рівні без втручання обслуговуючого персоналу. Вживане регулювання натиску дроселюванням відноситься до енергетично неефективних способів, прямий пуск двигунів насосів супроводжується значними пусковими струмами та призводить до гідравлічних ударів в водопровідній мережі.

Під час обстеження виконані виміри напруги, струмів, активної і реактивної потужностей, коефіцієнта потужності двигунів підживлювальних насосів з використанням аналізу тора електроспоживання AR5, набуті почасових значень тиску на вихідному колекторі і подачі води, а також даних по подачі вод за календарний рік (таблиця. 4.5).

Таблиця 4.5

**Середньочасова та середньодобова подачі нерегульованих
підживлювальних насосів**

<u>Місяць</u>	<u>Подача води за місяць, т</u>	<u>Середньодобова подача води, т/доб</u>	<u>Середньогодинна подача води, т/год</u>
1	307672	3473	144,7
2	95 409	3407	142
3	103 398	3335	139
4	11 916	3731	155,5
5	106 984	3451	143,8
6	91 003	3033	126,4
7	60 586	1954	81,4
8	29 004	935	39
9	87 360	2912	121,3
10	126 640	4085	170,2
11	113 407	3780	157,5
12	109437	3530	147,1
Усього за рік	1 142816	3131	

На рис. 4.3 показані усереднені характеристики роботи підживлювальних насосів в робітничі дні, а на рис. 4.4 - у вихідні дні.

Проведені виміри показують, що насосні агрегати недовантажені за потужністю, особливо вночі. За період вимірів отримані такі середні значення: споживаної активної потужності 51,9 кВт-год, споживаної реактивної потужності 41,9 кВАр-год, коефіцієнта потужності 0,768, витрати води 136,5 т/год. Питома витрата енергії становить 0,38 кВт-год. на 1 т води. Тиск на вихідному колекторі протягом доби змінюється від 28 до 38 м-коду, а подача води змінюється більш ніж у 10 разів. Регулювання тиску води здійснюється електричною заслінкою на вихідному колекторі, що дозволяє припустити непродуктивне витрачання значної частини

електроенергії.

Дійсно, якщо обчислити активну потужність, необхідну для транспортування води насосами при використанні перетворювача частоти, за формулою: $P = QNg\rho / \eta$

де P — потужність, Вт; Q — подача, м³/с; H — напір, м; g — прискорення вільного падіння, м/с²; ρ — щільність рідкої середовища, кг/м³; η — ККД насоса, прийнявши спільний ККД двигуна, насоса і ППЧ рівним 0,67, то отримаємо криві,

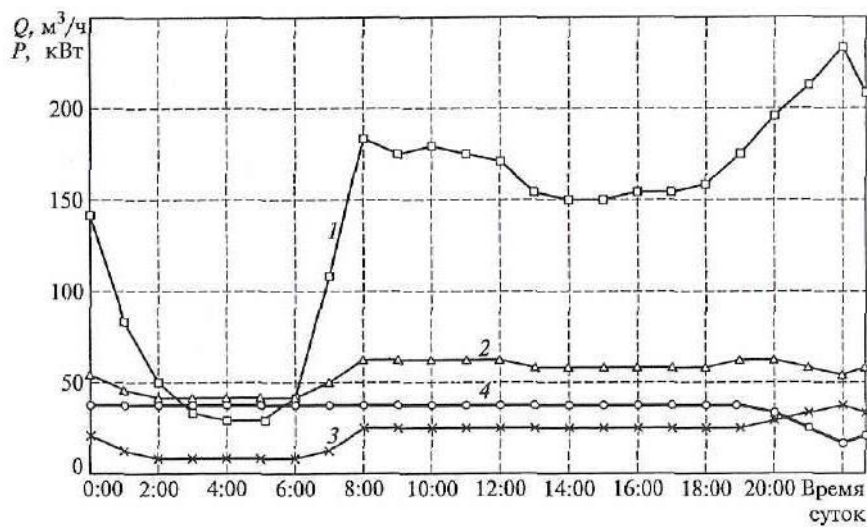


Рис. 4.4. Усереднені характеристики роботи підживлювальних насосів в буденні дні:

1 - витрата води, м³/год; 2- активна потужність з нерегульованим електроприводом, кВт; 3 - активна потужність з ППЧ, кВт; 4 - економія потужності, кВт

Віднімаючи значення активної потужності, що витрачається для транспортування води при використанні ПЧ (крива 3), з реально споживаної двигунами активної потужності (крива 2), можна знайти потужність, що непродуктивно витрачається, тобто передбачувану економію потужності при впровадженні частотно-регульованого електроприводу насоса (крива 4). Розрахунки виконані для усереднених

значень показників в буденні і вихідні дні. Відмітимо, що питома витрата електроенергії в частотно-регульованому електроприводі складе 0,138 кВт·год на 1 т води.

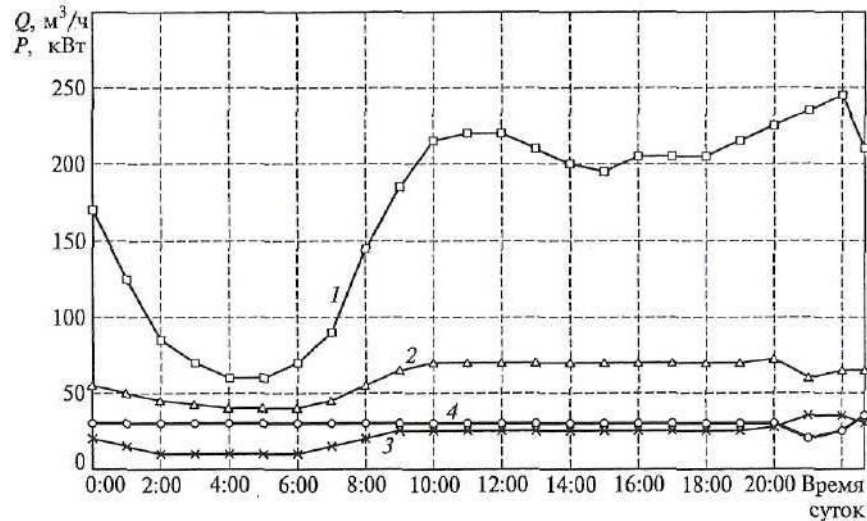


Рис. 4.4. Усереднені характеристики роботи підживлювальних насосів у вихідні дні:

1 — витрата води, м³/год; 2 — активна потужність з нерегульованим електроприводом, кВт; 3 — активна потужність з ППЧ, кВт; 4 — економія потужності.

Аналіз залежності енергетичних показників насосів від подачі води показав, що витрата активної енергії при використанні ППЧ росте приблизно пропорційно подачі води, витрата реактивної енергії при нерегульованому електроприводі практично не залежить від подачі і утримується на рівні 40...45 кВАр·год, витрата активної енергії росте майже лінійно від 38 кВт·год при подачі води 20 т/год до 63 кВт·год при подачі води 200 т/год. Передбачувана годинна економія електроенергії практично не залежить від подачі і складає в середньому 33 кВт·год. Зниження економії енергії при подачі води більше 200 т/год пояснюється тим, що при такому об'ємі подачі включається допоміжний насос і насправді витрата енергії збільшується

приблизно на 30...40 кВт·год, при цьому на таке ж число повинна збільшитися економія енергії. Оскільки включення допоміжного насоса відбувається достатньо рідко, можна за мінімальне значення годинної економії електроенергії прийняти 33 кВт·год. Це значення явно занижене, оскільки при розрахунку енергетичного ефекту не було враховано тиск на вході насосів, не рівне нулю, збільшення економії енергії влітку із-за зниження подачі і при підключенні допоміжного насоса.

Використовуючи набутого значення годинної економії електроенергії, нескладно підрахувати економію електроенергії за рік при впровадженні частотно-регульованого електроприводу. Вона складе $33 \cdot 24 \cdot 365 = 289080$ кВт·ч, тобто приблизно 800 кВт·год в добу.

Враховуючи, що споживання реактивної енергії частотно-регульованим електроприводом як мінімум на порядок нижче, ніж в нерегульованому електроприводі (коефіцієнт потужності ПЧ складає 0,98), споживання реактивної енергії скоротиться як мінімум на $40 \cdot 24 \cdot 365 = 350\,400$ кВАр./год в рік.

Для модернізації електроустаткування підживлювальних насосів пропонуються наступні основні рішення:

- установка перетворювача частоти для плавного пуску і регулювання частоти обертання двигунів насосів;
- установка пристрою м'якого пуску для ненаголошеного запуску нерегульованих електроприводів насосів;
- установка програмованого контролера для регулювання тиску і подачі води, управління електроустаткуванням насосів, автоматизації роботи і діагностики електроустаткування;
- модернізація пульта управління і сигналізації.
- При цьому зберігається можливість роботи насосів по існуючій схемі, з живленням двигунів від електричної мережі безпосередньо.

На рис. 4.5 приведена спрощена однолінійна схема електроустаткування підживлювальних насосів. Як приводні двигуни пропонується

використовувати існуючі короткозамкнуті асинхронні двигуни.

Економічний ефект від модернізації складається з економії електроенергії, зниження споживання реактивної потужності, скорочення експлуатаційних витрат, скорочення аварійності трубопроводів та їх елементів шляхом усунення гідравлічних ударів при плавному пуску насосів і підтримки тиску на мінімально необхідному рівні і др.

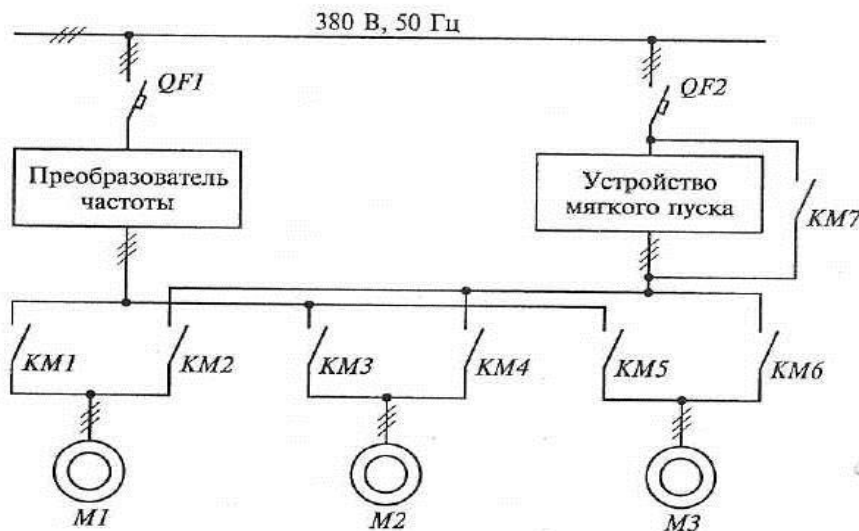


Рис. 4.5. Спрощена однолінійна схема електроустаткування підживлювальних насосів

Якщо економію експлуатаційних витрат і зниження аварійності на етапі проектування розрахувати у край складно, то передбачуваний ефект від економії електроенергії може бути легко знайдений за результатами вимірів і розрахунків, приведених вище. Приймаючи тариф за один кВт·год електроенергії в розмірі, припустимо, 4,6 грн., знайдемо річну економію від скорочення витрати електроенергії: $654188 - 289080 = 365\,108$ грн.

До об'єктів в системі теплопостачання, для яких доцільне застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу, відносяться дутьовий вентилятор і димосос котельної установки. Регулювання співвідношення паливо - повітря за допомогою дутьового вентилятора і розрядки в топці казана за допомогою димососа є одному з найбільш важливих завдань, оскільки це необхідно для підтримки якості теплоносія в

регламентованих межах. Проте традиційний спосіб регулювання дроселюванням забезпечує задовільне рішення цієї задачі не у всіх режимах роботи агрегату, тому виникла необхідність переказу вказаних турбомеханізмів на регульований привід. З погляду енергозбереження найбільш ефективним для цього є застосування асинхронного приводу з частотним управлінням. При цьому цілком природним представляється переклад системи управління на сучасну елементну базу на основі програмованого контролера.

Управління тягодутьовими механізмами котельної установки (вентилятором і дымососом) здійснюється за допомогою двох незалежних систем, основним призначенням яких є управління швидкістю приводних електродвигунів так, щоб в топці казана підтримувався оптимальний режим горіння, що створює сприятливі умови для повного згорання палива у всьому діапазоні продуктивності котельної установки. Для цього необхідно подати потрібну кількість повітря в топку казана залежно від кількості палива, що поступає, а також із заданою інтенсивністю видаляти з неї продукти горіння.

Додатково ці системи повинні виконувати лаву допоміжних функцій, а саме: забезпечення режиму вентиляції казана, підтримка заданого режиму у момент розпалювання, управління роботою апаратури, що запобігає впливу дестабілізуючих чинників на режими горіння і розпалювання.

Підтримка оптимального режиму горіння в топці забезпечується вибором необхідної швидкості електродвигунів тягодутьових механізмів при повністю відкритих направляючих апаратах практично у всьому діапазоні робочої продуктивності котельної установки. Проте інколи виникає нестійкий режим горіння при розпалюванні і в нижньому діапазоні його продуктивності: «відрив» полум'я від запальника або від пальника. Такий режим характеризується значними динамічними збуреннями тиску (розрядки) в топці казана, що викликаються роботою розташованих лавою інших котельних установок, які зв'язані газоходами із спільним димарем.

Причиною «відриву» полум'я може бути також природна тяга димаря. Дестабілізуючий вплив цих чинників необхідно зменшити або взагалі виключити. Для цього на час розпалювання казана і при його невисокій продуктивності направляючі апарати необхідно прикрити. Контур управління положенням направляючих апаратів вводиться як в систему управління вентилятором, так і в систему управління дымососом. За бажання ці контури можуть бути відключені.

Основним режимом роботи системи управління тягодутьовими механізмами є автоматичний. Він характеризується зміною режиму роботи казана залежно від сигналів, що поступають в систему управління. Так, що поступає з системи захисту вирішувальний сигнал переводить тягодутьові механізми котельної установки з первинного режиму вентиляції топкі в режим розпалу, а потім плавно із збільшенням кількості палива, що поступає, - в робочий режим, в якому у всьому діапазоні продуктивності казана підтримується необхідне співвідношення паливо - повітря. В разі виникнення аварійних ситуацій, при яких автоматика безпеки видає команду на відсічення казана, система управління тягодутьовими механізмами примушує агрегат перейти в режим вентиляції. Для налаштування різних систем управління агрегату передбачається ручний режим роботи тягодутьових механізмів з безпосереднім управлінням швидкістю двигунів. Переведення кожної системи управління з ручного режиму роботи в автоматичний і назад може бути проведений у будь-який момент часу незалежно від режиму роботи іншої системи управління.

Для оцінки економії електроенергії при переході до частотного регулювання були проведені виміри споживаної потужності двигунами дутьового вентилятора і дымососа. Параметри двигуна вентилятора АИРМ132М4: $P_{ном} = 11$ кВт, $n_{ном} = 1450$ об/хв, $\eta = 0,89$, $\cos\varphi_{ном} = 0,85$, $I_{ном} = 22$ А, $M_{ном} = 72$ Н-м; параметри двигуна дымососа АИР180М4: $P_{ном} = 30$ кВт, $n_{ном} = 1460$ об/хв, $\eta = 0,915$, $\cos\varphi_{ном} = 0,89$, $I_{ном} = 57$ А, $M_{ном} = 196$ Н-м.. Результати вимірів потужності,

споживаної двигунами вентилятора і димососу, виконані для систем з регулюванням направляючого апарату і частотним регулюванням, представлені на рис. 4.6 і 4.7. По кривих на рис. 4.6 і 4.7 може бути оцінена економія споживаної потужності при різних значеннях витрати.

В цілому економічний ефект в системі теплопостачання складається з наступних складових:

- поліпшення енергетичних показників котельної установки в цілому;
- забезпечення системою управління на основі програмованого контролера оптимальних режимів роботи котельної установки у всьому діапазоні її продуктивності;

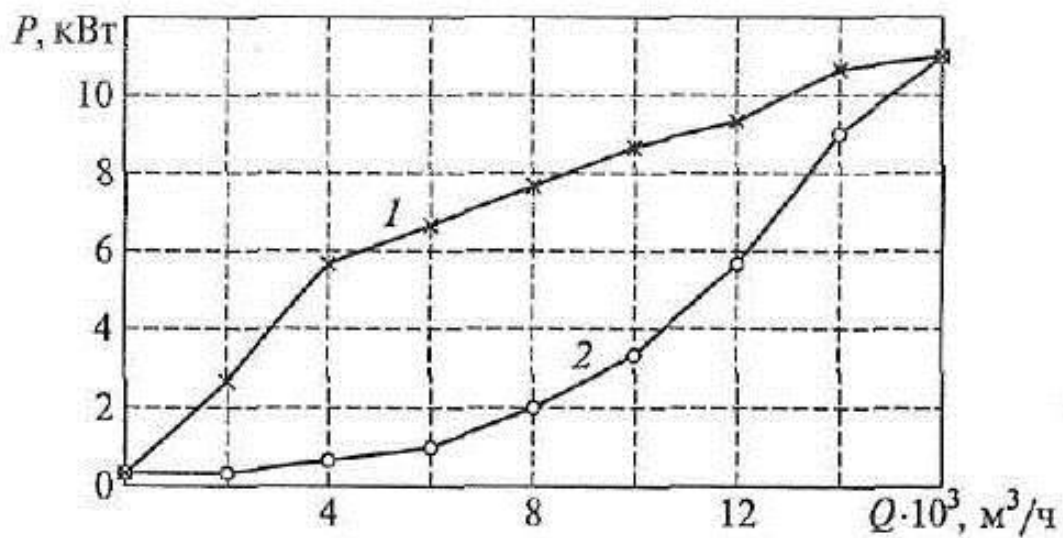


Рис. 4.6 Залежність потужності, споживаної двигуном вентилятора при регулюванні направляючим апаратом (1) і при частотному регулюванні (2) від витрати повітря

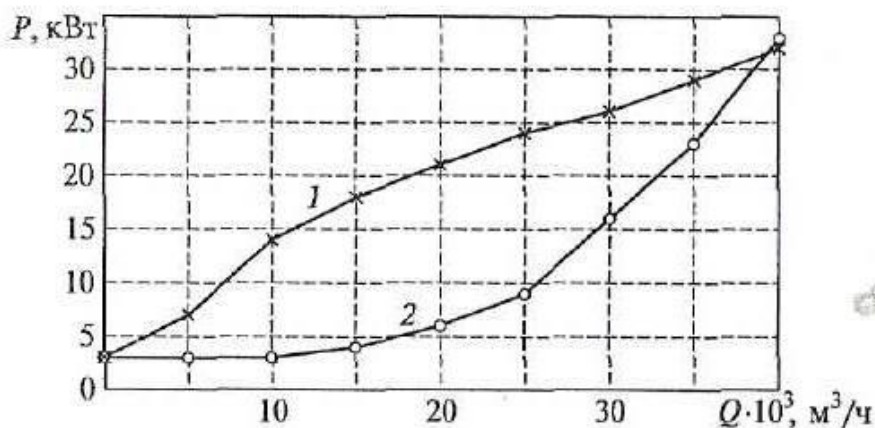


Рис. 4.7. Залежність потужності, споживаної двигуном димососа при регулюванні направляючим апаратом (1) і при частотному регулюванні (2) від витрати газоподібних продуктів горіння

- зменшення споживання електроенергії двигунами відцентрових механізмів;
- збільшення терміну служби механізмів, оскільки їх включення в роботу здійснюється плавно, практично з нульової швидкості, що із заданою швидкістю підвищується до потрібної;
- підвищення терміну служби контактно-комутаційної апаратури. При пуску електроприводу усунуті кидки струму, які пов'язані з прямим вмиканням двигуна в мережу. Величина пускового струму електроприводу не перевищує номінальну;
- покращення характеристик живлячої мережі. По всьому діапазону робочих швидкостей та навантажень коефіцієнт потужності електроприводу наближується до одиниці. Живляча мережа не навантажується реактивним струмом, і, як наслідок, відсутні додаткові втрати в провідних елементах.

4.3 Електроприводи ліфтів.

Застосування регульованих приводів в ліфтах дає можливість істотно підвищити показники комфортності експлуатації ліфта із-за ефективного

обмеження прискорень і ривків. При цьому пасажирів ліфту практично не відчують пересування. В свою чергу, плавні перехідні процеси, які забезпечуються частотно-регульованим приводом приводять до істотного скорочення динамічних навантажень в елементах кінематичного кола приводу, що дає можливість покращити надійність та довговічність роботи механічного устаткування ліфта, усуває необхідність частої заміни редуктора, канатоведучого шківів, гальмівних колодок, двигуна та елементів підвіски протитяги при роботі ліфта.

Перевагою застосування регульованого приводу в ліфтах, є скорочення енергоспоживання на 40... 60 %, що досягається в основному істотним скороченням моменту інерції лебідки головного приводу шляхом видалення маховика з провідного валу.

Застосування ТПЧ дозволяє використовувати в ліфтах одношвидкісні асинхронні двигуни із короткозамкненим ротором загального призначення. Маховий момент ротора таких двигунів на порядок менший від аналогічних ліфтових двошвидкісних двигунів, а вартість їх у 3-4 рази нижча порівняно з двошвидкісними.

Таким чином, економічний ефект від впровадження частотно-регульованого електроприводу в ліфтах складається з економії електроенергії та зниження експлуатаційних витрат. Для оцінки можливої економії електроенергії в електроприводах ліфтів було виконано моделювання процесів в двошвидкісному електроприводі ліфта і в частотно-регульованому. При моделюванні використані відомі моделі асинхронного електроприводу. Розглянемо наступні величини, які необхідні для оцінки енергетичних характеристик електроприводів за результатами моделювання.

1. Механічна потужність на валу двигуна $P_{\text{мех}} = M\omega$, де M, ω — відповідно момент і кутова швидкість двигуна.

2. Повна активна потужність, споживана з мережі, $P_1 = 3/2(u_{1u}i_{1u} + u_{1v}i_{1v})$, где i_{1u}, i_{1v}, u_u, u_v — відповідно проекції векторів струму і напруги статора в системі координат, що обертається.

Баланс потужностей без врахування втрат в сталі має вигляд $P_1 = P_{\text{мех}} + \Delta P_{l\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}}$.

3. Сумарні втрати в міді $\Delta P_M = \Delta P_{l\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}} = P_1 - P_{\text{мех}}$.

4. Втрати в колах статорів $\Delta P_{l\text{м}} = R_1(i_{sx}^2 + i_{sy}^2)$.

5. Втрати в роторних колах $\Delta P_{2\text{м}} = \Delta P_{\text{м}} - \Delta P_{l\text{м}}$.

6. Активна енергія, споживана з мережі $W_1 = \int P_1 dt$,

7. Енергія втрат $\Delta W_M = \int (P_1 - P_{\text{мех}}) dt$.

8. Цикловий ККД, тобто відношення механічної енергії до енергії споживаною з мережі за цикл роботи.

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{мех}}}{W_1} = \frac{\int_0^{T_{\text{ц}}} P_{\text{мех}} dt}{\int_0^{T_{\text{ц}}} P_1 dt}.$$

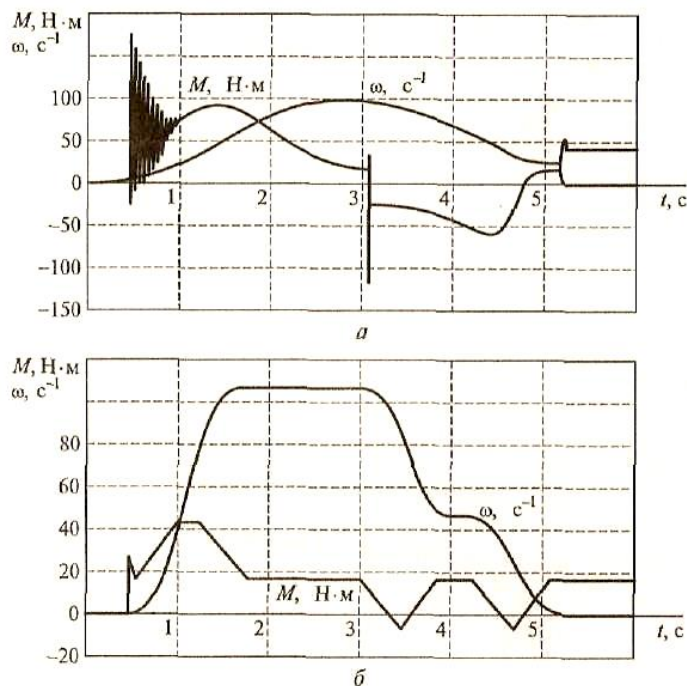


Рис. 4.8. Перехідні процеси в електроприводі ліфта при підйомі на один поверх з двошвидкісним нерегульованим (а) і частотно-регульованим (б) електроприводами

Характеристики ліфта з різними системами електроприводу

Характеристики	Тип електродвигуна	
	нерегульований	частотно-регульований
Тип електродвигуна	АНП180SA6/24	4A100L6Y3
Потужність, кВт	3/1	2,2
Номинальний струм, А	9/14,5	5,637
Момент інерції двигуна, кг-м ²	0,156	0,013
Момент інерції додаткових мас, що обертаються, кг-м ²	0,94	0,083
Момент інерції поступально рухомих мас, приведених до валу двигуна, кг-м ²	0,063	0,063
Сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна, кг-м ²	1,159	0,176

Як приклад на рис.4.8 показані характеристики перехідних процесів в електроприводі пасажирського ліфта вантажопідйомністю 400 кг і швидкістю переміщення 0,71 м/с з лебідкою типа Л471.00.000, отримані при моделюванні. На рис. 4.8, а видно, що перехідні процеси в двошвидкісному нерегульованому електроприводі супроводяться значними динамічними зусиллями. Так, процес пуску характеризується ударним моментом, що становить 5,8 номінального на низкополюсной обмотці. Перехід на знижену швидкість також характеризується ударним моментом, що становить 2,6 від номінального моменту двигуна на високополюсній обмотці. Такі значення ударних моментів приводять до прискореного руйнування кінематичної передачі, і в цьому випадку потрібна періодична заміна і ремонт устаткування. У таблиці. 4.7 приведені технічні дані ліфта з різними системами електроприводу, які використовувалися при моделюванні.

Таблиця 4.7

Розрахункові характеристики ліфта при 120 включеннях в годину

Характеристики	Тип електропривода	
	Нерегульований	частотно-регульований
Споживана енергія за 1 год роботи W_b кВт-год	1,898 1,02	1,141 0,24
Сумарні втрати за 1 год роботи ΔW_w кВт-год	0,43 0,59	0,16
Втрати в статорі за 1 год роботи ΔW_{im} кВт-ч	46	0,08
Втрати в роторі за 1 год роботи ΔW_{2u} кВт-ч		79
Цикловий ККД, %		

Результати енергетичних досліджень для ліфта при 120 вмиканнях за годину, тривалість включення (ПВ), рівного 60 %, з яких включення на зниженій швидкості складають 10%, а включення на робочій швидкості - 50%, приведені в таблиці. 4.7, а на рис. 4.9 показані діаграми, що характеризують споживання енергії електроприводом ліфта.

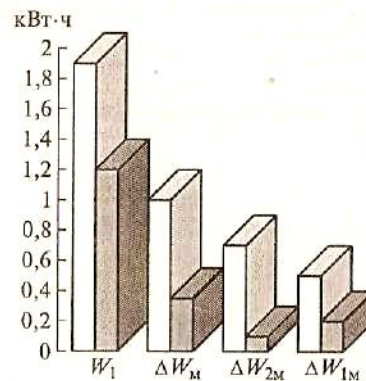


Рис. 4.9. Діаграми, що характеризують споживання енергії електроприводом ліфта

З аналізу даних таблиць. 4.7 витікає, що за одну годину роботи ліфта з використанням частотно-регульованого електроприводу витрачається на 0,757 кВт·год, або на 40%, менше енергії, чим з традиційним

двошвидкісним. Рахуючи середній машинний час роботи ліфта 6,8 год в 1 добу, можна обрахувати економію електроенергії за добу, яка складає 5,1 кВт·год. За рік буде заощаджено 1879 кВт год.

Економічний ефект від застосування частотно-регульованого електроприводу ліфта складається з економії електроенергії і скорочення експлуатаційних витрат та складає 365 108 грн. за рік. Розрахунки показують, що термін окупності в залежності від вантажопідйомності та інтенсивності експлуатації ліфта складає від трьох до восьми років. Менший термін окупності відповідає більшій вантажопідйомності та інтенсивності роботи ліфта. Для ліфта, що розглянули, розрахунковий термін окупності рівний 6,4 року.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведено аналіз ефективності використання тиристорних перетворювачів в електроприводах об'єктів житлово-комунального господарства.

Електропривод можна поділити на дві групи – нерегульований та регульований, який останнім часом набуває все більшого розповсюдження.

В магістерській роботі приділена увага енергозбереженню за допомогою регульованого електроприводу. Виявлені резерви з економії електроенергії в перехідних та усталених режимах роботи електроприводів.

Однією з складових підвищення економічної ефективності системи електропостачання є застосування тиристорних перетворювачів електроприводу. В наш час, слід віддати перевагу системі «тиристорний перетворювач частоти-асинхронний двигун» з векторним керуванням.

Застосування ТПЧ в технологічних процесах дає можливість скоротити енергоспоживання технологічним обладнанням. Ще більш доцільним є системний підхід, тобто використання перетворювачів частоти не в якості елементів схеми керування конкретної установки, а як складових комплексних систем з впровадженням широкого ряду засобів автоматизації технологічного процесу. Дані рішення дозволяють отримати додатковий ефект, який значно більший, ніж проста економія електричної енергії.

Використання ТПЧ дозволяє більш гнучко, плавно, динамічно, а головне, більш економічно впливати на виробничий процес; забезпечує найкращі показники якості і значне зниження не тільки енергоспоживання, але й інших ресурсів, а в деяких випадках навіть суттєво підвищує надійність і збільшує період роботи обладнання.

Доцільність впровадження ТПЧ для різних типів навантаження не однакова. Це, в першу чергу, пояснюється різними залежностями між швидкістю обертання і моментом опору.

Найбільш ефективним є впровадження ТПЧ для тих навантажень, механічна характеристика яких описується рівнянням квадратичної параболи, а отже, споживана потужність пропорційна кубу швидкості обертання. Тобто, навіть незначне зниження швидкості електропривода може дати значну економію електричної енергії. Теоретично для такого типу навантаження зниження швидкості на 10 % дає 30 % економію потужності. До такого типу навантажень відносяться відцентрові насоси та вентилятори.

Для оцінки ефективності частотного регулювання електроприводу насоса були виконані виміри витрати води і електроенергії протягом тижня з регульованим і нерегульованим електроприводами.

Було розроблено математичну модель насосу, яка відображає всі найбільш важливі при рішенні задачі оптимізації явища в силовій частині і головні особливості структурної побудови векторної системи управління асинхронним електроприводом. Досліджено динамічні характеристики АД, які показали, що використання перетворювачів частоти в електроприводах є досить ефективним способом енергозбереження.

При впровадженні частотно-регульованого приводу протікання плавних перехідних процесів призводять до значного скорочення динамічних навантажень в елементах кінематичного кола електроприводу, що дозволяє покращити надійність та довговічність експлуатації механічного устаткування ліфтів, усуває необхідність частої заміни редуктора, канатоведучого шківа, гальмівних колодок, двигуна та елементів підвіски протитяги при роботі ліфта.

В розділі охорони праці розглянута безпечна експлуатація електродвигунів, технічне обслуговування та ремонт електричних машин та проведений вибір захисту та пуску ліфта.

В економічній частині проведені розрахунки оцінки річних витрат електроенергії, орієнтовний термін окупаємості встановленого частотно-регульованого електропривода, розрахунок трудомісткості ремонтно-експлуатаційних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.Методичні вказівки до виконання магістерських робіт на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня – магістр електротехніки за фахом 8.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання». /Укл.: П.Г.Плешков, Н.Ю.Гарасьова – Кіровоград: КДТУ, 2002-44 с.

2.П.Г.Плешков, Ю.І.Казанцев, А.Ю.Орлович. Основи енергозбереження та енергозберігаючі режими в системах електропостачання промислових підприємств. – Кіровоград: РВЛ КНТУ 2007.

3.Браславский И.Я., Костылев А.В., Степанюк Д. П. Оптимизация энергопотребления при реализации пусковых режимов в системах ТПН— АД // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт». — Харьков, 2003. - Вып. 10. - Т. 1. - С. 222-223.

4.Кращі практики з енергозбереження. *Комунальне господарство: підприємства тепло-, водопостачання та водовідведення*. Реформування тарифів та реструктуризація комунальних підприємств в Україні, ПАДКО 2002.

5.Бабокин Г. И. Энергосбережение в электроприводе конвейера // Изв. вузов. Горный журнал. — 2002. — № 1. — С. 122—125.

6.Браславский И. Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. - 1998. -№ 8. - С. 2-5.

7.Браславский И. Я., Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В. Об эффективности применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода в подъемно-транспортных механизмах // Проблемы автоматизирован электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт». — Харьков, 2003. — Вып. 10. — Т. 1. — С. 144—145.

8.Браславский И.Я., Ишматов З.Ш. Реализация энергосберегающих технологий на основе регулируемых асинхронных электроприводов // Электроинформ. — Львов, 2003. — № 1. — С. 11 —14.

9.Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. — 2-е изд., доп. — М.: Наука, 1966. — 297 с.

10. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. — М.: ИК «ЯГОРБА» — Биоинформсервис, 1998. — 180 с.

11. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. — М.: Энергоиздат, 1981. — 184 с.

12. Проектирование электроприводов переменного тока с преобразователями частоты. — SEW Eurodrive, 1997. — 56 с.

ДОДАТОК А. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ДЛЯ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ

А.1 Оцінка економічної ефективності впровадження регульованого асинхронного електропривода насосної станції.

Структура витрат на проведення дослідно-конструкторських і впроваджуваних робіт включає:

- проведення дослідної роботи в об'ємі, який залежить від виду і значення технологічного обладнання, і з метою пошуку технічних можливостей для зниження споживання електричної енергії;
- визначення і закупівлю необхідного обладнання і комплектуючих;
- розробку і впровадження технічних рішень;
- обробку і аналіз результатів дослідів або дослідної експлуатації;
- оформлення технічної документації;
- при необхідності, проведення атестації технічних засобів з метою подальшого їх виробництва.

Визначення економічної ефективності технічних рішень по економії електроенергії розглянемо на прикладі методики розрахунку економічної ефективності застосування частотно-регульованого електропривода (ЧПР).

В відповідності з вказаною методикою визначення економічного ефекту проводиться на основі наступних вимірів і розрахунків.

1. Знімають безпосередньо на обладнанні насосної станції паспортні дані насоса і електродвигуна:

Таблиця А.1

Паспортні дані насоса і електродвигуна

номінальний напір насоса	$H_{\text{ном}}$, м.вод.ст.	1075
номінальна продуктивність	$Q_{\text{ном}}$, м ³ /год	150
номінальний ККД насоса	$\eta_{\text{ном.н}}$	0.55
номінальна потужність електродвигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	630
ККД електродвигуна номінальний	$\eta_{\text{ном.д}}$	0.97

2. В період максимального водоспоживання (8-10 год. або 18-20 год.) вимірюється діючий напір на вході насоса ($H_{вх}$), виході насоса ($H_{вих}$), на виході в магістраль ($H_{вих.дрос.}$). Заміри здійснюються за допомогою штатних манометрів, встановлених в системі; протягом двох годин роблять декілька вимірювань з наступним обчисленням середнього значення цих трьох параметрів.
3. Вимірюється середня годинна витрата води протягом доби (Q_{cp} , м³/год) за різницею показів витратоміра на початку Q_1 і в кінці Q_2 контрольної доби:

$$Q_{cp} = \frac{Q_2 - Q_1}{24} = \frac{1250 - 600}{24} = 27 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (\text{A.1})$$

4. Визначають мінімально необхідний загальний напір ($H_{необх}$):

$$H_{необх} = CN + D = 3 \cdot 14 + 15 = 57 \quad (\text{A.2})$$

де N – число поверхів самого високого будинку в районі, підключеному до даного насоса, $N = 14$; C – коефіцієнт, який приймається значенням 3 для стандартних будинків, 3.5 – для будинків підвищеної комфортності; доданок D береться рівним 10 для одиничних будинків, 15 – для групи будинків, які стоять окремо.

Крім того, необхідний напір повинен бути скоректований виходячи з географічної різниці висот місцевості, так як це може відповідати перепадам 15-20 м. Найбільш точним є визначення різниці висот між місцем розташування насоса і найбільш високою точкою приймача води, який підключений до магістралі.

5. Визначають потрібний напір ($H_{потр}$), який забезпечується регулюючим насосом:

$$H_{потр} = H_{необх} - H_{вх} = 57 - 40 = 17 \text{ м} \quad (\text{A.3})$$

У випадку суттєвої зміни напору в магістралі, яка підводиться (на вході насоса) значення $H_{вх}$ потрібно брати мінімальним.

$$H_{вх} = H_{вх\min} = 40 \text{ м}$$

6. Розраховуємо потрібну потужність частотно-регулюючого електропривода для забезпечення $H_{потр}$:

$$P_{пч} = (1.1 - 1.2) \frac{H_{потр} \cdot Q_{ср}}{367 \cdot \eta_n \cdot \eta_{ном.д}} = 1.15 \cdot \frac{17 \cdot 27}{367 \cdot 0.55 \cdot 0.97} = 2.7 \text{ кВт} \quad (A.4)$$

ККД насосу $\eta_n = k \eta_{ном.н} = 1 \cdot 0.55 = 0.55$, де коефіцієнт k визначається за кривою (рисунок А.1) для витрати $Q_{ср}$, виміряної раніше і віднесеної до $Q_{ном}$.

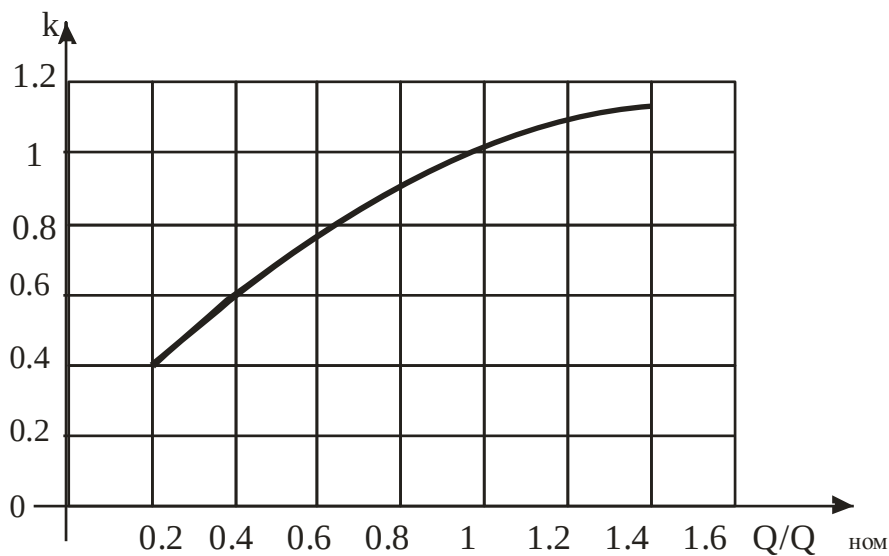


Рисунок А.1 Визначення коефіцієнту k за кривою для витрати $Q_{ср}$, виміряної раніше і віднесеної до $Q_{ном}$.

7. Оцінка річних витрат електроенергії ($\Delta E_{ек}$) здійснюється за виразом:

$$\Delta E_{ек} = \Delta E_{річ} C_e = \frac{(H_{вих} - H_{необх}) \cdot Q_{ср}}{367 \cdot \eta_n \cdot \eta_{ном.д}} = \frac{(70 - 57) \cdot 27}{367 \cdot 0.55 \cdot 0.97} \cdot 8760 \cdot 4.6 = 72236.4$$

(грн./рік) (A.6)

де $\Delta E_{річ}$ - електроенергія, яка була зекономлена за рік, кВт/год; $t_{год}$ - число годин роботи обладнання в рік; C_e - ціна 1 кВт/год електроенергії.

8. Ціна річної економії води ($C_{ев}$) за рахунок зменшення втрат:

$$C_{ев} = \Delta B_{річ} \cdot C_v = 0,07 \cdot \frac{H_{вихдрос} - H_{необх}}{10} \cdot Q_{ср} \cdot t_{річ} \cdot C_v =$$

$$0,07 \cdot \frac{98-57}{10} \cdot 27 \cdot 8760 \cdot 0,93 = 3054643 (\text{грн} / \text{рік}) \quad (\text{A.7})$$

де $\Delta B_{річ}$ - вода, яка була зекономлена за рік, м³; C_v - вартість 1 м³ води.

9. У випадку передачі гарячої води втрати тепла пов'язані зі збільшенням втрат гарячої води при підвищеному напорі. Для типових розрахунків кількість річної економії тепла $C_{ет}$ за рахунок зменшення втрат гарячої води при наявності ЦТП або котельних, витрата гарячої води приймається в розмірі 0.4 від загальної витрати води, яка подається насосною станцією:

$$C_{ет} = \Delta \theta \cdot C_m = \Delta t \cdot 0.4 \cdot \Delta B_{річ} \cdot C_m =$$

$$20 \cdot 0.4 \cdot 67881,24 \cdot 40 = 217219.74 (\text{грн} / \text{рік}) \quad (\text{A.8})$$

де $\Delta \theta$ - кількість зекономленого за рік тепла, Гкал; Δt - розрахунковий перепад температури перегріву гарячої води при нормі 60 °C; C_m - вартість однієї гектокалорії тепла для даного регіону.

10. Орієнтирний термін окупності $T_{ок}$ встановленого частотно-регулюючого електропривода складає:

$$T_{ок} = \frac{C_{пч}}{C_{ек} + C_{ев} + C_{ет}} = \frac{156540}{11659,18 + 63129,3 + 8688,79} \approx 2 \text{ роки} \quad (\text{A.9})$$

де $C_{пч}$ - вартість перетворювача частоти з врахуванням проектно-конструкторських робіт і монтажу,

$$C_{пч} = C_{обл} + C_{мон}, \quad (\text{A.10})$$

$$C_{обл} = C_{тпч} + C_{пр} = 120000 + 88450 = 208450 \text{ грн.},$$

$$C_{мон} = 20\% \cdot C_{обл} = 20\% \cdot 130450 = 41690 \text{ грн.},$$

$$C_{пч} = 208450 + 41690 = 250140 \text{ грн.}$$

Слід відмітити, що можливе зменшення терміну окупності, якщо врахувати зниження витрат на технічне обслуговування і збільшення терміна амортизації обладнання.

А.2 Оцінка економічної ефективності впровадження тиристорного перетворювача електропривода насосу

Для оцінки ефективності частотного регулювання електропривода насосу були виконані заміри витрати води і електроенергії протягом тижня з регульованим і нерегульованим електроприводами. Дані за виконаними замірами приведені в таблиці А.2.

Таблиця А.2

Залежність витрати енергії від типу електропривода насосної станції

День, час добы	Покази лічильників		Витрата за період замірів		Середньодобова витрата	
	води, м³	<u>електро- енергії, кВт·год</u>	води, м³	<u>електро- енергії, кВт·год</u>	води, м³	<u>електро- енергії, кВт·год</u>
При використанні регульованого електропривода						
1-й день, 19.00	399213	154100	6583	1280	940.4	182.86
8-й день, 19.00	405796	155380				
При використанні нерегульованого електропривода						
1-й день, 19.00	405796	155380	8772	2140	1253.1	307.4
8-й день, 19.00	414568	157532				

Їх аналіз показує, що середньодобова економія води при роботі регулюючого електропривода

$$E_{в(ср.д.)} = E_{в.нерег.} - E_{в.рег.} = 1253.1 - 940.4 = 312.7 \text{ м}^3, \quad (\text{А.11})$$

або 24.95 %,

а середньодобова економія електроенергії

$$E_{ел(сер.д.)} = E_{ел.нерег.} - E_{ел.рег.} = 307.4 - 182.186 = 124.54 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

або 40.5 %,

де $E_{в.нерег.}$, $E_{ел.нерег.}$ – відповідно середньодобові витрати води і електроенергії при використанні нерегульованого електропривода;

$E_{в.рег.}$, $E_{ел.рег.}$ – відповідно середньодобові витрати води і електроенергії при використанні регульованого електропривода.

Для визначення річного економічного ефекту від впровадження регулюючого асинхронного електропривода розраховуємо річну економію:

води

$$E_{в.річ.} = E_{в(сер.д.)} \cdot 365 = 312.7 \cdot 365 = 114134.5 \text{ м}^3, \quad (\text{A.12})$$

електроенергії

$$E_{ел.річ.} = E_{ел(сер.д.)} \cdot 365 = 124.53 \cdot 365 = 45457.09 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Розраховуємо загальну економію за формулою

$$E_{\Sigma} = k_1 E_{в.річ} + k_2 E_{ел.річ} = 26 \cdot 114134.5 + 4,6 \cdot 45457.1 =$$
$$= 2987862 \text{ грн}, \quad (\text{A.13})$$

де k_1, k_2 – відповідно вартість в гривнях подачі і каналізації 1 м³ води та 1 кВт·год електроенергії.

Визначаємо термін окупності

$$T_{ок} = \frac{E_{нч}}{E_{\Sigma}} = \frac{306540}{2987862} = 0,1 \text{ року} \quad (\text{A.14})$$

де $E_{нч}$ – вартість обладнання і робіт по впровадженню частотно-регулюючого електропривода,

$$E_{ПЧ} = E_{обл} + E_{роб}, \quad (\text{A.15})$$

$$E_{обл} = E_{ТПЧ} + E_{пр} = 160000 + 95450 = 255450 \text{ грн.},$$

$$E_{роб} = 20\% \cdot E_{обл} = 20\% \cdot 169450 = 51090 \text{ грн.},$$

$$E_{ПЧ} = 169450 + 33890 = 306540 \text{ грн.}$$

Структура економії річних витрат така: 13...15 % - економія енергії; 63...64 % - економія від зниження витрати води; 21...24 % - економія від зниження витрат на каналізацію води. Енергетична складова економії є не такою великою в порівнянні з ефектом від зниження витрати води.

А.3 Розрахунок економічної ефективності впровадження тиристорних перетворювачів

Розрахунок проведений для приводу з наступними параметрами:

Таблиця А.3

Паспортні дані насоса і електродвигуна	
Потужність насоса, P_n (кВт)	200
ККД насоса, η_n (%)	55
Напір насоса, H (м)	50
Продуктивність насоса, Q (м ³ /год)	180
Потужність двигуна, $P_{дв}$ (кВт)	200
Струм двигуна, $I_{дв}$ (А)	363
Напруга живлення двигуна, $U_{дв}$ (В)	380
ККД двигуна, $\eta_{дв}$ (%)	60
$\cos\varphi_{дв}$	0.9
Тариф за електроенергію, T_e (грн/кВт·год)	0.2
Вартість ЧРП, $CT_{чрп}$ (грн)	40000
Що перекачується	Холодна вода

Таблиця А.4

Вимірювані дані	
Результати виміру при повністю закритій напірній засувці	
Потужність, $P_{зак}$ (кВт)	99
Результати виміру при повністю відкритій напірній засувці	
Потужність, $P_{відк}$ (кВт)	168
Продуктивність насоса, Q (м ³ /год)	180

Таблиця А.5

Добовий графік зміни витрати												
Інтервали часу, год	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
Усереднена витрата, м ³	900	700	700	1000	900	850	800	800	1150	1200	1300	1100

Таблиця А.6

Результати розрахунку	
Річна економія електроенергії	45457, 09 кВт год
Вартість зекономлених електроенергії й ресурсів	2987862 грн./рік
Термін окупності установки ЧРП	0,1 року

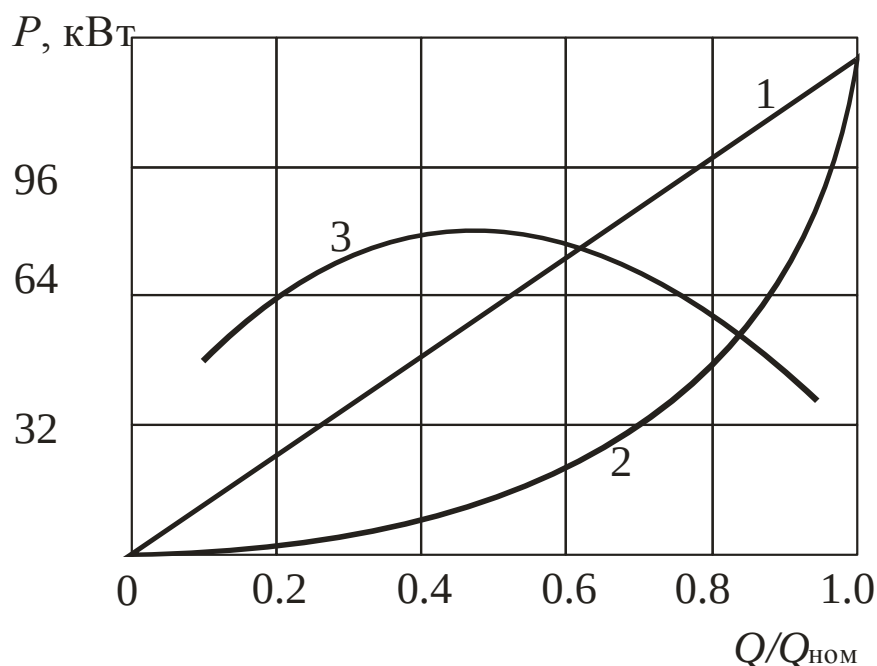


Рисунок А.2 Економія електроенергії від використання дроселювання і ТПЧ:

1 – Дроселювання; 2 – ТПЧ; 3 – Економія електроенергії

Використовуючи приведений вище графік, визначається економія електроенергії для кожного інтервалу часу, а потім добова і річна економія. Для визначення економії грошових коштів визначається вартість зекономленої електроенергії і враховується фактор економії перекачуваного матеріалу при впровадженні частотно-регульованого електропривода.

ДОДАТОК Б. ТЕХНІЧНІ ЗАХОДИ, ЯКІ МАЮТЬ ЗАБЕЗПЕЧУВАТИ БЕЗПЕКУ РОБІТ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках служить захисне заземлення.

Захисне заземлення – це примусове електричне сполучення із землею або з її еквівалентом металічних не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по будь-яким причинам (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу, розряд блискавки і т. п.).

Еквівалентом землі може слугувати рідина річок та морів, кам'яне вугілля в підземному заляганні тощо.

Призначення захисного заземлення – виключення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучим металічним частинам, що опинилися під напругою в наслідок замкнення на корпус та по іншим причинам.

Крім захисного заземлення існує робоче заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Робоче заземлення – це примусове сполучення з землею окремих точок струмового кола, якими є, наприклад нейтральні точки обмоток генераторів, точки силових та вимірювальних трансформаторів, дугогасячих пристроїв, реакторів поперечної компенсації в дальніх лініях електропередач, а також фази при використанні землі в якості фазного чи оберненого проводу. Робоче заземлення призначається для встановлення належної роботи електроустановок в нормальних або аварійних умовах і створюється безпосередньо (тобто за допомогою з'єднання проводом частин, які заземлюються з заземлювачем) або через спеціальні пристрої – пробивні запобіжники, розрядники, резистори тощо.

Заземлення блискавкозахисту – це примусове сполучення із землею блискавкоприймачів та розрядників для відводу від них струмів блискавки в поверхню землі.

Принцип дії захисного заземлення – зменшення до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими причинами. Воно досягається зниженням потенціалу заземленого обладнання (зниженням опору заземлювача), а також вирівнюванням потенціалів поверхні, на якій стоїть людина, та заземленого обладнання (підвищення потенціалу поверхні, на якій стоїть людина, величини, наближеної до величини потенціалу заземленого обладнання).

Область застосування захисного заземлення:

✓ *мережі змінного струму напругою до 1000 В*– трифазні трипроводні з ізольованою нейтраллю, однофазні двопроводні, ізольовані від землі, а також постійного струму двопроводні з ізольованою середньою точкою обмоток джерела струму;

✓ *мережі змінного і постійного струму напругою вище 1000 В* з будь – яким режимом нейтралі чи середньою точкою обмоток джерела струму.

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час вельми ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих не струмоведучих частинах.

Захисні заходи від ураження електричним струмом.

Безпека електроустановок досягається декількома шляхами:

1. Виконання установок у відповідності із ПУЕ, СніП, галузевими правилами та іншими нормативним. В цих документах передбачаються необхідні захисні заходи електробезпеки, які повинні бути передбачені при проектуванні і спорудженні електроустановок.
2. Дотримання правил ПТЕ та ПТБ. Сюди також входить застосування індивідуальних захисних засобів і пристосувань.

3. Застосування відповідної конструкції електрообладнання (закриті, комплектні, блокування, додаткова ізоляція).

Вимог до захисних заходів електробезпеки та їх суворість розрізняються в залежності від низки факторів, до числа яких відносяться:

1. Вид установки: підстанції, промислові підприємства, жилі споруди і їх окремі приміщення (жилі, побутові, ванни), електроприміщення, тваринницькі приміщення тощо.
2. Номінальні напруги мереж і режим нейтралі.
3. Умови навколишнього середовища: наявність підвищеної або особливої небезпеки, пожежної чи вибухової небезпеки.
4. Категорії, що доторкаються до електроустановки (люди, тварини, навчений персонал, діти).
5. Призначення обладнання: стаціонарне, пересувне, спеціального призначення (електро-медичне, лабораторне, вибухозахищене) і т. і.

Організація безпечної експлуатації електроустановок.

Електроустановкою називається сукупність машин, пристроїв, апаратів, ліній електропередачі та допоміжного устаткування (в тому числі споруди і приміщення, в яких вони встановлені), та призначені для виробництва, перетворення, трансформації, передачі розподілення електроенергії і перетворення її в інший вид енергії.

Розрізняють електроустановки відкриті і закриті.

Відкритими або зовнішніми електроустановками називають електроустановки, які незахищені будівлею від атмосферних впливів, і захищені лише сітчастими огорожами і т.і.

Закриті або внутрішні електроустановки - це електроустановки, які розміщені в середині.

За умовами електробезпеки електроустановки поділяють на електроустановки напругою до 1000 В і напругою вище 1000 В.

Особи, які обслуговують електроустановки, в залежності від покладених на них обов'язків і виконуваної роботи поділяються на наступні групи: адміністративно – технічний персонал, оперативний, ремонтний, оперативно – ремонтний і не електротехнічний персонал.

Особи, які обслуговують електроустановки, не повинні мати хвороб, які заважають виробничій роботі і які підсилюють небезпеку впливу електричного струму на організм.

Персонал, що несе чергування в електроустановках, що приймає безпосередню участь в оперативних перемиканнях, а також той, який виконує ремонтні, монтажні, налагоджувальні і інші роботи в діючих електроустановках підлягає медичному огляду при прийомі на роботу а потім 1 раз в 2 роки.

Щойно прийняті на роботу особи перед відвідуванням ними даного підприємства повинні отримати дозвіл та пройти Ввідний інструктаж, а потім для отримання дозволу на відвідування робочого місця повинні пройти Первинний інструктаж.

Особи із числа чергового і оперативно - ремонтного персоналу до призначення на самостійну роботу зобов'язані, крім того, пройти необхідну теоретичну підготовку; навчання на робочому місці; перевірку знань ПТЕ і ПТБ, виробничих і посадових інструкцій в об'ємі, обов'язковому для даної посади; дублюванні, тобто виконання обов'язків чергового по місцю роботи.

Інший прийнятий виробничий персонал, а також ремонтний, керівники і інженерно – технічні робітники допускаються до самостійної роботи після первинної перевірки знань ПТБ, ПТЕ і виробничих посадових інструкцій.

Перевірка знань персоналом правил і інструкцій повинна поводити спеціально складена приказом або розпорядженням керівництва підприємства комісія у складі 3 чоловік в індивідуальному порядку.

Перевірку знань ПТЕ і виробничих інструкцій слід вести, як правило, одночасно з перевіркою знань ПТБ, але з окремим оформленням результатів перевірки в спеціальному журналі.

В результаті перевірки знань тому хто перевірявся присвоюється відповідно його знанням, стажу і досвіду роботи кваліфікаційна група з техніки безпеки; особі, яка пройшла первинну перевірку знань, видається “Посвідчення про перевірку знань з технічної експлуатації і техніки безпеки”, в якому вказуються результати перевірки знань (первинної і періодичної) і присвоєна кваліфікаційна група з техніки безпеки.

В залежності від тих чи інших умов, які підвищують небезпеку дії струму на людину, різним приміщенням притаманний різний ступень небезпеки ураження струмом – одним більша іншим – менша.

Згідно з діючими правилами всі приміщення поділяються на три класи за ступенем небезпеки враження людей електричним струмом:

1. небезпечні;
2. з підвищеною небезпекою;
3. особливо небезпечні.

До небезпечних приміщень відносяться сухі, без пилу приміщення з нормальною температурою повітря, з ізольованою підлогою, в яким відсутні заземлені елементні предмети чи їх дуже мало.

До приміщень з підвищеною небезпекою відносяться приміщення:

1. вологі;
2. жаркі;
3. із струмопровідним пилом;
4. із струмопровідними підлогами;
5. ті в яких можливе одночасне доторкання людини до металоконструкцій будівель, які мають з'єднання з землею, технологічним апаратам, механізмам тощо, з одного боку, і до металевих корпусів електрообладнання, з іншої.

До особливо небезпечних відносяться:

1. особливо вологі;
2. з хімічно активною чи з органічним середовищем;
3. приміщення, що мають дві та більше ознаки, властиві приміщенням з підвищеною небезпекою.

Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів: “Не вмикати працюють люди”, “Не відкривати працюють люди”.
3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановки.
5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Розрахунок заземлення.

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть потрапити під напругу, повинні бути заземлені

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів - Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю 27 А. Для цехового обладнання використовується заземлення. Цехові підстанції отримують живлення від 2 кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Ґрунт – супісь , другий кліматичний район.

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжини з'єднувальної смуги з розміщенням на плані.

Визначаємо норму на опір заземлення R_3^H .

Якщо заземлюючий пристрій застосовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В і вище:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом};$$

Згідно ПУЕ, так як сумарна потужність струмоприймачів більш 100 кВА то R_3 повинен бути не більше 4 Ом. Приймаємо $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 200 \cdot 1,3 = 260 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де $\rho_{\text{табл}}$ - табличне значення, для чорнозему $\rho_{\text{табл}} = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ табл. 3.10 [10]; ψ - підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів $\psi = 1,2 \dots 1,4$.

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$R_o = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = 0,366 \frac{260}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 15,1 \text{ Ом};$$

l – довжина заземлювача, приймаємо 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 прокладки смуг (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Приймаємо електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану і знаходимо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_e}{R_3^H \cdot \eta_o} = \frac{15,1}{4,059} = 6,4 \approx 7 \text{ шт.}$$

Де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $a/l = 4/5 = 0,8$, $\eta_o = 0,59$ за рисунку 7.5 [10].

Де $a = 4 \text{ м}$ – відстань між електродами згідно ПУЕ.

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

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

Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \frac{260}{29,4 \cdot 0,51} \lg \frac{2 \cdot 29,5^2}{0,01 \cdot 7} = 27,88 \text{ Ом;}$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм

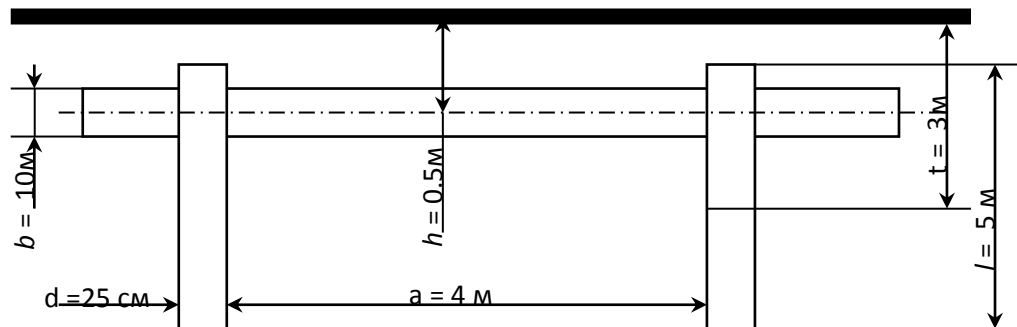


Рисунок 13.1 - Схема прокладки заземлення

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_3^H}{R_n \cdot R_3^H - 4} = \frac{27,98 \cdot 4}{27,88 - 4} = 4,67 \text{ Ом.}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{15,1}{4,67 \cdot 0,59} = 5,5 \approx 6 \text{ штук.}$$

Проводимо перевірку опору заземлювача і порівнюємо отримане значення з нормованим:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{4,67} + \frac{1}{28,88}} = 3,99 \text{ Ом.}$$

Перевірка: $3,99 < 4 \text{ Ом}$