

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Енергозберігаючий електропривод насосу для теплопостачання багатоповерхового будинку»

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Давидов Д. Н.

(прізвище та ініціали)

Керівник Лєві Л.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
 робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Бакалавр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
 електроніки та телекомунікацій



О.В. Шефер

«01» квітня 2025 р.


ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ Давидову Денису Ніловичу

1. Тема проекту (роботи) «Енергозберігаючий електропривод насосу для теплопостачання багатоповерхового будинку»
 керівник проекту (роботи) Леві Леонід Ісаакович, д.т.н., професор
 затверджена наказом вищого навчального закладу від 03. 03. 2025 року
 № 306/1– ф,а.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідними даними є матеріали зібрані під час проходження практики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд систем електроприводу, що застосовуються в насосних установках. Вибір раціональної системи ЕП та розроблення функціональної схеми автоматизованого ЕП. Енергетична ефективність асинхронних ЕП насосів та вплив зміни навантаження на втрати в електроприводі насосної установки. Математичне моделювання ЕП гідронасосу і його параметрів. Розроблення двоконтурної системи стабілізації тиску насосом. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Актуальність і мета роботи. Характеристики продуктивності відцентрового насоса при дросельному та частотному регулюванні. Споживана потужність електроприводом відцентрового насосу при дросельному і частотному регулюванні в залежності від витрат рідини і статичного напору. Основні характеристики способів регулювання відцентрового насоса при регулюванні подачі за рахунок зміни частоти обертання двигуна. Функціональна схема асинхронного частотно-регульованого електроприводу зі скалярним керуванням. Імітаційна модель системи перетворювач частоти – асинхронний електродвигун із насосним навантаженням. Імітаційна модель одномасової механічної системи з

реактивним навантаженням. Імітаційна модель задатчика швидкості з S подібною характеристикою та її часова діаграма. Імітаційна модель завдання на силовий канал системи перетворювач частоти – асинхронного електродвигуна. Двоконтурна система стабілізації тиску. Діаграми відпрацювання електроприводом насоса ступінчастого циклу: 5 Гц, 15 Гц, 25 Гц, 50 Гц. Діаграми відпрацювання електроприводом насоса програми пуску без компенсації вольтажних частотних характеристик. Результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при різних частотах. Структурна схема адаптивного алгоритму керування перетворювачем частоти

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Дата початку	Етап	Відсоток виконання	
1	Огляд систем електроприводу, що застосовуються в насосних установках. Вибір раціональної системи ЕП та розроблення функціональної схеми автоматизованого електроприводу насосу.	22.04.25	I	20%	Пл. 1,2
2	Енергетична ефективність асинхронних електроприводів насосів. Вплив зміни навантаження на втрати в електроприводі насосної установки.	08.05.25		40%	Пл. 3,4
3	Розроблення імітаційних моделей електроприводу зі скалярним керуванням. Аналіз результатів імітаційного моделювання системи перетворювач частоти-асинхронний електродвигун.	22.05.25	II	60%	Пл. 5,6
4	Розроблення двоконтурної системи стабілізації тиску насосом.	30.05.25		80 %	Пл. 7-9
5	Робота над висновками та оформлення кваліфікаційної роботи.	10.06.25	III	100%	Пл. 10-1

Студент  (підпис) Давидов Д.Н. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  (підпис) Леві Л.І. (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	8
1.1. Проектування функціональної схеми автоматизованого електроприводу	8
1.1.1 Огляд систем електроприводу, що застосовуються в насосних установках	8
1.1.2 Вибір раціональної системи ЕП та розроблення функціональної схеми автоматизованого електроприводу насосу	13
1.2 Висновки за розділом.....	16
2 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	17
2.1 Енергетична ефективність асинхронних електроприводів насосів.....	17
2.1.1 Вплив зміни навантаження на втрати в електроприводі насосної установки.....	17
2.1.2 Особливості використання автоматизованого електроприводу відцентрових насосів.....	21
2.1.3 Особливості автоматизації електроприводу турбомеханізмів.....	31
2.2 Висновки за розділом.....	39
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	40
3.1 Математичне моделювання ЕП гідронасосу і його параметрів.....	40
3.2 Розроблення імітаційних моделей електроприводу зі скалярним керуванням.....	42
3.3 Імітаційна модель одномасової механічної системи з реактивним навантаженням	44

3.4 Імітаційна модель за датчика інтенсивності з S-подібною характеристикою.....	45
3.5 Імітаційна модель завдання на силовий канал системи перетворювач частоти- асинхронний електродвигун.....	46
3.6 Розроблення двоконтурної системи стабілізації тиску насосом.....	49
3.7 Висновки за розділом.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
Література.....	62
Додатки.....	65

Вступ

Питання підвищення енергоефективності електроприводів насосів для перекачування теплоносіїв, останнім часом мають гостру актуальність.

З аналізу світового і вітчизняного досвіду побудови енергоефективних електроприводів [1, 2], можна зробити наступні висновки: при роботі цього обладнання необхідно змінювати режими роботи електродвигунів у широких межах, але головною метою є максимальна економія електроенергії. Тому, питання вибору системи керування електроприводом з регулюванням подачі тиску рідини є дуже важливим етапом проектування обладнання.

Зростаючі технологічні вимоги до якості виробничих процесів, необхідність впровадження високих технологічних критеріїв обумовлюють стійку тенденцію впровадження у реальний сектор економіки та виробництва регульованих електроприводів.

Сучасні системами управління електроприводом повинні забезпечувати максимальну економію електроенергії, високу точність регулювання, оптимальний закон управління, мати високу надійність і невисоку вартість. Такі системи управління будуються на базі мікропроцесорів і дозволяють досягти високих показників потрібних технологічних параметрів.

Широке використання регульованих електроприводів привело до того, що сучасний електропривод є не тільки енергосиловим, що дозволяє забезпечити виробничі механізми необхідною енергією, а й засобом управління технологічними проблемами, так як завдання по реалізації якості виробництва виробничих процесів в даний час у більшості випадків покладаються на системи управління регульованими електроприводами в поєднанні з системами технологічної автоматики.

У зв'язку зі зростанням цін на енергоносії, зокрема на електроенергію, обмеженими можливостями збільшення потужності енергогенеруючих установок, проблемами енергозбереження, в тому числі зниження

електроспоживання, обумовлюють актуальність кваліфікаційної роботи бакалавра.

Енергозбереження стало одним з пріоритетних напрямів технічної політики у всіх розвинених країнах світу. Це пов'язано, по-перше, з не відновлювальністю енергоенергетичних засобів, по-друге, з безперервно зростаючими складнощами їх видобутку і вартістю, по-третє, з глобальними екологічними проблемами, що позначилися на рубежі тисячоліть [3].

Енергозбереження є найбільш дешевим і безпечним способом збільшення енергогенеруючих потужностей, так як витрати на економію 1кВт потужності в 4-5 разів дешевше, ніж вартість наново введеного 1 кВт потужності.

Основні втрати (до 90%) приходяться на сферу енергоспоживання, в якій повинні бути сконцентровані основні зусилля по енергозбереженню електроенергії. Так як електроприводи споживають до 70% згенерованої електроенергії, найбільш суттєва економія електроенергії може бути досягнута при використанні регульованих електроприводів для управління технологічними процесами, що в сполучення з можливостями автоматизації може забезпечити оптимальне використання електроенергії та інших ресурсів.

У зв'язку з тим що серед регульованих електроприводів домінуюче положення займають частотно-регульовані електроприводи, їх масове застосування дозволяє вирішувати не тільки технологічні завдання, але і проблему енергозбереження.

У даній роботі в систематизованому вигляді викладено комплекс питань, пов'язаних з можливостями енергозбереження при використанні регульованих електроприводів, головним чином керуючих; обґрунтовані раціональні способи застосування енергозберігаючого електроприводу; намічені схемні рішення, що забезпечують енергозбереження при управлінні різними технологічними процесами і механізмами; дана кількісна оцінка зниження електроспоживання.

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1.1 Огляд систем електроприводу, що застосовуються в насосних установках

У сучасних і зарубіжних системах регулювання режимів роботи насосного устаткування регульованим параметром є напір рідини. Сучасний розвиток техніки дозволяє підтримувати заданий напір з великою точністю.

Висока точність відпрацювання заданих параметрів спричиняє безперервну зміну частоти обертання електродвигуна насосного агрегату і внаслідок цього сприяє виникненню знакозмінних навантажень на окремі елементи насосного агрегату (еластичні муфти, що з'єднують насос з двигуном і ін.). Тому в ряді випадків доводиться встановлювати підвищену зону нечутливості системи регулювання, що знижує точність стабілізації опору [4].

Стабілізація напору рідини здійснюється за рахунок того, що при зменшенні водозабору напір в мережі збільшується, а частота обертання електродвигуна насосу в результаті дії системи регулювання зменшується.

При збільшенні водопостачання, навпаки, напір рідини в мережі падає, а частота обертання збільшується. Основна мета системи стабілізації напору рідини в системі трубопроводів полягає в підтримці напору на заданій відмітці.

У системах стабілізації напорів у мережі, необхідно передбачати включення додаткових нерегульованих насосів при суттєвих збільшеннях притоку або водопостачання та відключення їх при зменшенні. Регульованим приводом повинні оснащуватися найбільші агрегати з найбільш пологою характеристикою. У випадку використання однотипних насосів для уникнення утворення мертвих зон робочого колеса нерегульованих насосів, вони повинні мати діаметри робочих трубопроводів, менші регульованих. При рівності

діаметрів і роботі регульованого насосу в режимі максимальної подачі з підвищеною частою обертання (у разі застосування частого електроприводу) він повинен бути укомплектований двигуном підвищеної потужності в співвідношенні з рекомендаціями [5].

Незважаючи на явні переваги, регульований електропривод ще не отримав широке розповсюдження в насосних установках. Бурхливий розвиток напівпровідникової техніки дозволив створити на базі статичних перетворювачів надійні і порівняльно недорогі регульовані електроприводи. Крім того, світова енергетична криз наочно продемонструвала справжню цінність енергетичних ресурсів і стимулювала заходи з їхнього раціонального використання. У результаті цього розширилися роботи по дослідженню, розробці і створенню інноваційних насосних установок, оснащених автоматизованим регульованим електроприводом.

У насосній станції звичайний короткозамкнений асинхронний електродвигун потужністю 110 кВт включений через перетворювач частоти [6]. Система управління електроприводом побудована аналогічно традиційним, за винятком того, що в якості датчика рівня в системі використаний ультразвуковий рівномір ЕХоЗ. Застосування частотного електроприводу в цій установці зменшує споживання електроенергії на 60 тисяч. кВт/год на рік, тобто, приблизно на 5%.

У сучасних станціях використовуються також частотні перетворювачі типу ПЧР-2, на основі яких створені і працюють понад 10 систем автоматичного розрегулювання режиму роботи насосних станцій з агрегатами потужністю від 75 до 160 кВт. Система регулювання з застосуванням частотного перетворювача типу SAMI фірми Stromberg забезпечує економію електроенергії 7-8% від загальної її потреби.

Частотні перетворювачі - високонадійні та достатньо компактні системи регулювання наносних агрегатів. Для забезпечення рівномірного використання наносних агрегатів передбачається пристрій, за допомогою якого вони можуть почергово підключатися до одного перетворювача.

Відомі випадки застосування вітчизняних частотних перетворювачів типу ПШТ м. Харків. На насосних станціях великої продуктивності, з використанням електропривода на базі вентильного електродвигуна, використано шість насосів марки 30-ФВ-17, встановлених на станції, один з них оснащений таким електроприводом з застосуванням перетворювача ПЧВН, розробленого НДІ ХЕМЗ. Потужність електроприводу 1600 кВт, напруга двигуна 10 кВ. Перетворювач під'єднаний через знижуючий сухий трансформатор потужністю 4000 кВА, а двигун – до перетворювача через такий же підвищуючий трансформатор. До складу перетворювача входить також тиристорний перетворювач живлення системи збудження синхронного електродвигуна. В якості датчика рівня використаний повітряний дзвон і дифманометр з виходом 0-5 мА. У системі управління використаний ПІ-регулятор типу Р-17. Застосування САК із регульованим електроприводом знизило споживання електроенергії приблизно на 1200 кВт/г на рік, поліпшило умови експлуатації насосного обладнання, полегшило умови роботи оперативного персонала.

Аналіз роботи САК електроприводом насосного агрегату показують, що обладнання аналогічним електроприводом другого насосного агрегату дозволяло б збільшити економію електроенергії майже вдвічі. На станції пройшов перевірку пристрій, що виключає роботу регульованого насоса в зоні низьких ККД.

Можливість управління частотою обертання короткозамкнених асинхронних електродвигунів широко доведена.

Реалізувати цю можливість пощастило лише з появою силових напівпровідникових приладів - спочатку тиристорів, а пізніше транзисторів IGBT. В даний час у всьому світі широко реалізується спосіб управління асинхронною машиною, яка сьогодні розглядається не тільки з точки зору економії енергії, але й з точки зору вдосконалення керування технологічним процесом.

Управління електродвигунами змінного струму ускладнене рядом обставин, з яких найбільш суттєві це:

- момент електродвигуна визначається добутком двох результуючих векторів електромагнітних параметрів статора і ротора і є функцією чотирьох змінних;
- є сильна взаємодія намагнічуючих сил статора і ротора, взаємний стан яких неперервно змінюється при обертанні ротора;
- з метою кращого використання двигуна в різних режимах його роботи виникає задача регулювання магнітного потоку двигуна.

Вимоги до електроприводу визначаються діапазоном регулювання швидкості і типом навантаження. Залежність між швидкістю обертання і моментом опору неоднакові для навантажень різного типу.

Деякі види навантаження мають змінну механічну характеристику, для якої момент навантаження нарощується зі збільшенням швидкості обертання. Типовим прикладом установок з таким навантаженням є насоси, чия механічна характеристика описується рівнянням квадратичної параболи, а значить, необхідна потужність пропорційна кубу швидкості обертання. З цього випливає, що навіть невелике зниження швидкості електроприводу може дати значний вигравш у потужності – ось чому економія електроенергії є головною перевагою використання керованого електроприводу для насосів. Теоретичне зниження швидкості на 10% дає тридцять відсоткову економію по потужності.

Використання регульованого електроприводу в турбомеханізмі дозволяє вигравати наступні моменти:

- високий коефіцієнт потужності ($\cos\phi$) допомагає знизити витрати на електроенергію.
- за рахунок ліквідації струмових піків при запуску відпадає необхідність в електричних кабелях великого перерізу, в той час як двигуни з прямим підключенням до мережі живлення поглинають струм, що в 6-7 разів перевищує номінальне значення.

Таким чином, можна уникати небезпеки ураження великими струмами, а також знизити монтажні витрати.

- відсутності потреби в техобслуговуванні: інвертор не вимагає технічного обслуговування, так як складається зі статичних елементів.

- економія електроенергії від 30 до 60%.

Тому зростає число підприємств, що розглядають застосування електроприводів з регульованою частотою обертання як ключ до енергозбереження, підвищення рентабельності і конкурентоспроможності підприємства, поліпшення екологічної обстановки.

Досвід індустріально розвинутих країн показує, що при ефективній технологічній політиці питання про те, куди направляти капіталовкладення – на збільшення виробництва електроенергії або на енергозбереження, в переважній більшості випадків вирішується на користь інвестицій в енергозбереження [7].

За даними консалтингової групи AGC Advisory Group (США), в 2024 року світовий ринок регульованих електроприводів оцінювався приблизно в 2,6 млрд USD і в найближчі кілька років буде рости щороку на 5,3%.

Передбачається, що за п'ять років в індустріально розвинених країнах відношення нерегульованого і регульованого електропривода становить 1:2. В Україні регульований електропривод становить поки не більше 2- 2,5% всього ринку приводів.

Створення силових напівпровідникових приладів з новими властивостями і характеристиками дозволило здійснювати перетворення електричної енергії у формах, найбільш зручних для її електромеханічного перетворення, що відкрило широкі можливості для створення технічно досконалих регульованих електроприводів. А використання досягнень мікропроцесорної і комп'ютерної техніки принципово змінило елементну базу, функціональні можливості та "інтелект" системи управління електроприводами. Наприклад, за даними інституту електроенергетики США, в рамках реалізації Програми по реконструкції 60 енергоблоків ТЕС в період з 1986 по 1995 р. запроваджено більше 300 частотно-регульованих

електроприводів потужністю від 630 до 4500 кВт напругою 2400, 4160 і 6600 В, що забезпечило річну економію електроенергії близько 1 млрд кВт/г. Крім прямої економіки електроенергії, застосування потужних частотно-регульованих електроприводів дозволило підняти потужність енергоблоків.

Для порівняння ефективності управління засобами за допомогою ПЧ візьмемо результати досліджень, що проводилися в Польщі. Традиційно для регулювання тиску використовуються засувки, які змінюють продуктивність насосу. При використанні регульованого електроприводу з перетворювачем частоти продуктивність насосу може змінюватися за рахунок зміни частоти обертання двигуна [4].

Високі показники економіки електроенергії пов'язані також з тим, що в результаті випробувань виявлено суттєве завищення номінальної потужності застосовуваних двигунів. При використанні перетворювачів частоти в даній системі можуть застосовуватися електродвигуни суттєво меншої номінальної потужності. Проектування різних систем поводження з використанням регульованого асинхронного електроприводу дозволяє оптимізувати їх стан, забезпечити зменшення їх вартості і суттєву економію електроенергії при експлуатації [2].

1.1.2 Вибір раціональної системи ЕП та розроблення функціональної схеми автоматизованого електроприводу насосу

Вибір системи управління здійснюється на основі аналізу порівняльних технічних даних, а саме: діапазону регулювання, способу керування, ресурсу – умов зносостійкості, діапазону можливих потужностей електроприводів, енергетичні й динамічні показники, а також додаткові дані, котрі визначають умови експлуатації електроприводу.

Економічна оцінка системи керування повинна базуватися на принципі мінімальних витрат, пов'язаних з початковими затратами, експлуатаційними

видатками на ремонт, а також витратами на електроенергію. Вибирається система, що має найкращі економічні показники.

Якщо економічні показники порівняно близькі, то виконується додаткова оцінка за макрогабаритними показниками і умовами. В даний час найбільше розповсюдження отримали системи електроприводів змінного струму, оскільки вони дешевші і надійніші електроприводів постійного струму [8]. Вибираємо скалярне керування насосами, так як воно має наступні переваги:

Економічний ефект від застосування перетворювачів частоти: економія електричної енергії завдяки оптимізації роботи на 30% -60%, зниження надмірних витрат води до 5% і зменшення прихованих витоків води за рахунок забезпечення постійного тиску в мережі і зняття надлишкового напору. Зменшення напору при стабільній подачі. Зменшення механічної а, як наслідок, й електричної потужності, що споживана з мережі, завдяки зменшенню швидкості обертання двигуна. Відсутність гідравлічних втрат, внаслідок відсутності дросельних елементів. Зменшення реактивної потужності, якою обмінюється електродвигун з мережею живлення.

Проектований автоматизований електропривод насоса має датчик напіру, регулятор тиску, на вхід якого подається різниця сигналу завдання та зворотного зв'язку за вимірним значенням напору.

У схему також введемо зворотний зв'язок за струмом двигуна для компенсації падіння напруги на активному опорі статора. Даний сигнал зворотного зв'язку віднімається від заданого значення ЕРС статора і надходить на блок регулятора напруги. Підтримка напору в заданих межах здійснюється зміною швидкості обертання двигуна за допомогою регулятора частоти. У блоці управління силовими ключами обробляються сигнали з регуляторів частоти і напруги, на основі яких виробляються імпульси керування. Отримана функціональна схема автоматизованого електроприводу представлена на рисунку 1.1.

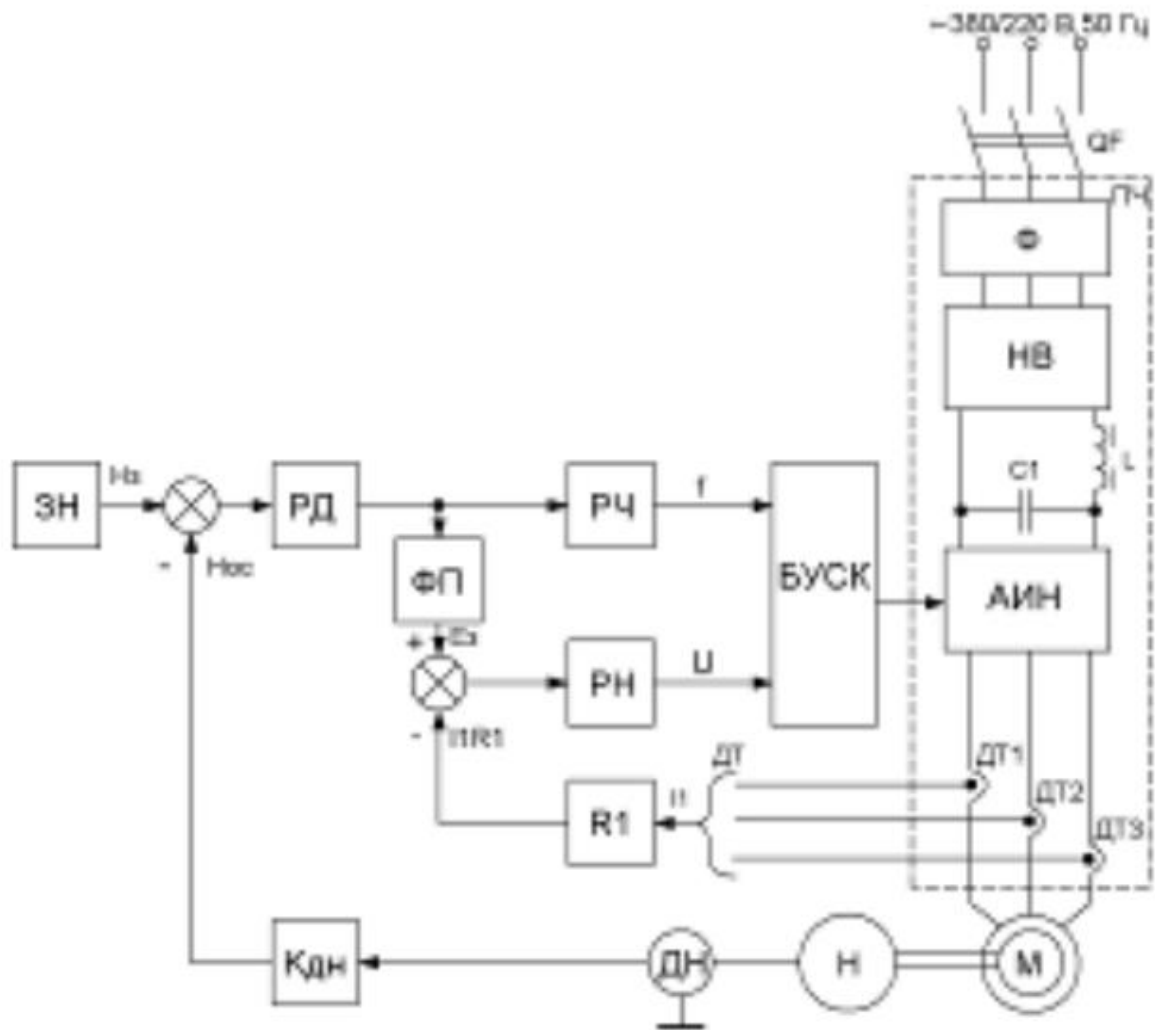


Рисунок 1.1 – Функціональна схема автоматизованого електроприводу насоса

ЗН – задавач напору, H_z – напруга сигналу завдання напору, $H_{зз}$ – напруга сигналу зворотного зв'язку за виміряним напором, РТ – регулятор тиску, ФП - функціональний перетворювач ЕРС, РЧ – регулятор частоти, РН – регулятор напруги, М – асинхронний електродвигун, Ф – фільтр, Н – насос, ПЧ - перетворювач частоти, ДТ1-ДТ3 – датчики струму, АИН – автономний інвертор напруги, ДН - датчик напору, НВ – некерований випрямляч, $K_{дн}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по напору, БУСК - блок управління силовими ключами.

1.2 Висновки за розділом

1. В ході роботи над першим розділом кваліфікаційної роботи бакалавра, проведено огляд систем електроприводу, що застосовуються в насосних установках. Встановлено, що висока точність відпрацювання заданих параметрів спричиняє безперервну зміну частоти обертання електродвигуна насосного агрегату і внаслідок цього сприяє виникненню знакозмінних навантажень на окремі елементи насосного агрегату (еластичні муфти, що з'єднують насос з двигуном і ін.). Тому в ряді випадків доводиться встановлювати підвищену зону нечутливості системи регулювання.

2. Вибір раціональної системи ЕП насососу здійснено на основі аналізу порівняльних технічних даних, а саме: діапазону регулювання, способу керування, діапазону потужностей електроприводів, енергетичних і динамічних показників, а також додаткових даних, котрі визначають умови експлуатації електроприводу насосної установки для транспортування теплоносія багатоповерхового будинку.

3. Остаточний вибір системи електроприводу здійснено на користь асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням.

4. Розроблено функціональну схему автоматизованого електроприводу насосної установки для транспортування теплоносія багатоповерхового будинку.

2 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ АСІНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСІВ

2.1.1 Вплив зміни навантаження на втрати в електроприводі насосної установки

Постійні втрати асинхронного електроприводу не залежать від його навантаження і залишаються практично незмінними при незмінній швидкості. Разом з тим змінні втрати, до яких віднесені втрати в меді статора і ротора, залежать від навантаження. Є велика кількість механізмів, в яких навантаження електроприводу залежить від характеру механізму, на які можна вплинути в процесі проектування або експлуатації.

В якості прикладу розглядаємо багатодвигунні електроприводи таких механізмів, як рольганги, механізми переміщення крану, поворотні платформи транспортних машин і т.д. Досить часто електроприводи механізмів виконують двох-або багатодвигунними для зменшення їх моменту інерції, що дозволяє поліпшити динаміку процесів [9].

У всіх цих механізмах швидкість двигунів, як правило, однакова, а розподіл статичного навантаження, якщо не прийняті спеціальні заходи, виявляється нерівномірною. Причиною нерівномірного навантаження двигунів зазвичай є незначна відмінність механічних статистичних характеристик двигунів.

На рис. 2 представлені механічні характеристики двох однакових асинхронних двигунів при живленні їх від мережі.

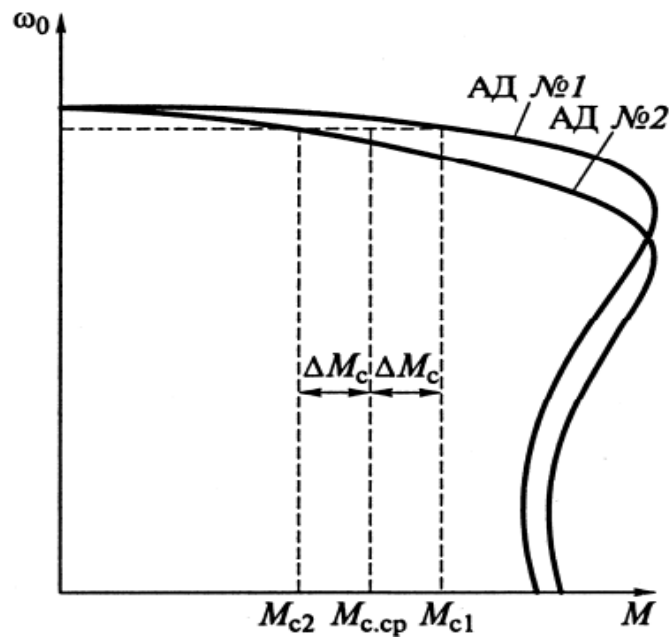


Рисунок 2.1 – Розподіл моменту навантаження між двома паралельно працюючими двигунами

При однаковій частоті обертання моменти двигунів відповідно для АД №1 і АД №2 визначаються виразами:

$$M_{c1} = M_{c.cp} + \Delta M_c; \quad M_{c2} = M_{c.cp} - \Delta M_c,$$

де $M_{c.cp}$ – середнє значення статичного моменту, $M_{c.cp} = (M_{c1} + M_{c2}) / 2$; ΔM_c – відхилення статичного моменту від середнього.

Очевидно, що аналогічна картина буде спостерігатися і в регульованих електроприводах. Причиною цього є як розкид параметрів окремих двигунів, так і відмінності в налаштуваннях систем управління. Проведемо оцінку впливу нерівномірності поділу навантажень на втрату енергії в двигуні.

Змінні втрати енергії в двигуні (втрати в меді статора і ротора) можна виразити через змінні:

$$\Delta P_M = M \omega_0 S (1 + a), \quad (2.1)$$

де $a = \Gamma_1 / \Gamma_2'$.

Так як робота двигуна в рушійному режимі (режимі двигуна) відбувається на лінійній ділянці механічної характеристики, то ковзання двигуна можна досить точно виразити через момент:

$$S = M/\beta\omega_0, \quad (2.2)$$

де β – жорсткість лінійної ділянки механічної характеристики, $\beta = M_{ном}/\omega_0 S_{ном}$.

Втрати в меді в номінальному режимі роботи двигуна (при $M = M_{ном}$) складають:

$$\Delta P_{ном} = \frac{1+a}{\beta} M_{ном}^2.$$

Тоді при роботі двигуна з моментом, відмінним від номінального, втрати в міді визначаються за таким співвідношенням:

$$\Delta P_M = \Delta P_{M_{ном}} (M/M_{ном})^2.$$

Для приведеного вище прикладу втрати в міді першого двигуна складають

$$\Delta P_{M(1)} = \Delta P_{M_{ном}} \left(\frac{M_{с.ср} + \Delta M_c}{M_{ном}} \right)^2,$$

Для іншого асинхронного двигуна, відповідно:

$$\Delta P_{M(2)} = \Delta P_{M_{ном}} \left(\frac{M_{с.ср} - \Delta M_c}{M_{ном}} \right)^2,$$

Сумарні втрати обох електродвигунів становлять:

$$\Delta P_{M\Sigma} = 2\Delta P_{M_{ном}} \frac{M_{с.ср}^2 + \Delta M_c^2}{M_{ном}^2}.$$

Очевидно, що якщо двигуни завантажені однаково, то сумарні втрати в двох двигунах становлять:

$$\Delta P_{m\Sigma} = 2\Delta P_{m.ном} \frac{M_{c.ср}^2}{M_{ном}^2},$$

Тобто менші на величину додаткових втрат:

$$\Delta P_{m\Sigma доп} = 2\Delta P_{m.ном} \frac{M_c^2}{M_{ном}^2}.$$

В якості прикладу виконаємо розрахунок втрат в міді в двох двигунах типу МТМ412-6, що працюють на загальне навантаження.

Двигуни мають наступні номінальні дані: $P_{нм} = 22$ кВт; $\omega_{ном} = 100,51$ с⁻¹; $S_{ном} = 0,04$; $G_1 = 0,218$ Ом; $G_2 = 0,1922$ Ом.

Втрати в міді в номінальному режимі роботи складають

$$\Delta P_{н} = 1,95 \text{ кВт} = 0,09 P_{н}.$$

Якщо $M_{c.ср} = 0,5 M_{ном}$, то при $\Delta M_c = 0,2 M_{ном}$ втрати в двигуні з найбільшим навантаженням становлять $\Delta P_{м}(\Delta 0) = 0$ кВт, а в двигуні з найменшим навантаженням $\Delta P_{м}(2) = 0,32 \Delta P_{м.ном} = 0,09 \Delta P_{ном} = 0,176$ кВт.

Сумарні втрати в двох двигунах

$$\Delta P_{м\Sigma} = 0,58 \Delta P_{м.ном} = 1,131 \text{ кВт}.$$

При рівномірному розподілі навантаження

$$\Delta P_{м\Sigma} = 0,5 \Delta P_{м.ном} = 0,975 \text{ кВт}.$$

Додаткові втрати в меді при нерівномірному поділі навантаження $\Delta P_{м\Sigma доп} = 0,08 \Delta P_{м.ном} = 0,156$ кВт.

Якщо $\Delta M_c = 0,5 M_{ном}$, то додаткові втрати в меді обох двигунів відростуть до величини $\Delta P_{м\Sigma доп} = 0,5 \Delta P_{м.ном} = 0,975$ кВт.

На перший погляд економія енергії за рахунок вирівнювання навантажень цих двигунів незначна, але слід врахувати дві обставини.

По-перше, витрати на вирівнювання навантажень двигунів, як правило, невеликі. Так, у випадку використання двигунів з фазним ротором це може бути зроблено за рахунок невеликої зміни додаткових опорів у колі ротора. У системах ТПН - АД це потребує більш ретельного налаштування регуляторів електропроводів і більше точного формування сигналів.

По-друге, при масовому використанні таких електроприводів сумарна економія енергії може бути відчутною.

2.1.2 Особливості використання автоматизованого електроприводу відцентрових насосів

Турбомеханізми, до яких відносяться і відцентрові насоси для перекачування води, нафтопродуктів й інших рідин, споживають понад 25% всієї електроенергії, що виробляється в Україні. Робота цих систем відрізняється нерівномірним споживанням води, теплової енергії, повітря протягом дня в залежності від погодних умов та пори року.

Потужність промислових насосів лежить в межах від одиниць кіловат до кількох десятків мегават. За призначенням розрізняють наступні групи насосів:

- комунального і промислового водопостачання;
- заглибні для подачі води або нафти зі свердловин;
- циркуляційні;
- підживлюючі;
- водовідливні;
- для транспорту нафти, пульпи та ін.

Насоси, як правило, працюють на мережу з протитиском, причому статичний напір у мережі становить зазвичай не менше 20% повного напору.

Винятком є циркуляційні насоси, які можуть працювати на мережу трубопроводів, що практично не має статичного опору.

Зазвичай насоси оснащуються нерегульованим електроприводом.

Регулювання подачі здійснюється при цьому практично єдиним способом - розподілом на стороні нагнітання.

Регулювання подачі насосів застосовують у наступних випадках:

1. За необхідності регулювання кількості рідкості, що подається насосом, за вимогами технологічного процесу або у зв'язку з випадковою зміною. Наприклад, подачу рідини циркуляційним насосом системи охолодження

потрібно регулювати в залежності від кількості теплоти, що підлягає відведенню; Подача води насосом повинна змінюватися відповідно режиму тепло-водопостачання [10].

2. Якщо не вимагається під час роботи регулювання подачі рідини насосом, але забезпечення потрібної подачі пов'язане з попереднім регулюванням насосу. Наприклад, для подачі рідини на певну висоту H при постійних витратах Q і опорі гідромережі, за каталогом вибираються найближчий, але більший насос за номінальним напором та витратами перекачуваної рідини. Тому для роботи за заданими параметрами напору i (або) витрати води, повинні бути знижені до потрібних значень. Якщо насос працює при незмінній швидкості, то найпростішим способом регулювання його подачі є дроселювання, іншими словами, неповне відкриття засувки на опорному трубопроводі [10].

Характерним прикладом є станції гарячого і холодного водопостачання і системи опалення будинків. Механізми цих станцій, вибрані виходячи з максимальної продуктивності, значну частину часу працюють з меншою продуктивністю, що визначається зміною споживання води та теплоносія в різні часи доби та в різні пори року.

По деяким даним середньодобове завантаження насосів гарячого водопостачання становить 50 ... 55% від максимального значення.

Існуючі системи теплопостачання з нерегульованим електроприводом не забезпечують ефективного зниження споживаної потужності в процесі зменшення витрат води, а також створюють при цьому надлишковий тиск води в гідросистемі, що спричиняє витоки води і несприятливо впливає на роботу технологічного обладнання й мереж водо і теплопостачання.

Прилюструємо добре відому енергетичну і технологічну неефективність дросельного регулювання подачі води насосом.

Потужність, що споживається насосом, визначається за формулою

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta},$$

де P - потужність, кВт; Q – подача, $\text{м}^3/\text{с}$; H - напір, м; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ – щільність рідкого середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$; η - ККД насоса.

На рис. 2.2 показані характеристики продуктивності відцентрового насоса при дросельному і частотному регулюванні. Крива 1 характеризує роботу нерегульованого електроприводу на номінальній частоті обертання приводного електродвигуна, крива 3 характеризує роботу магістралі після повного відкриття засувки.

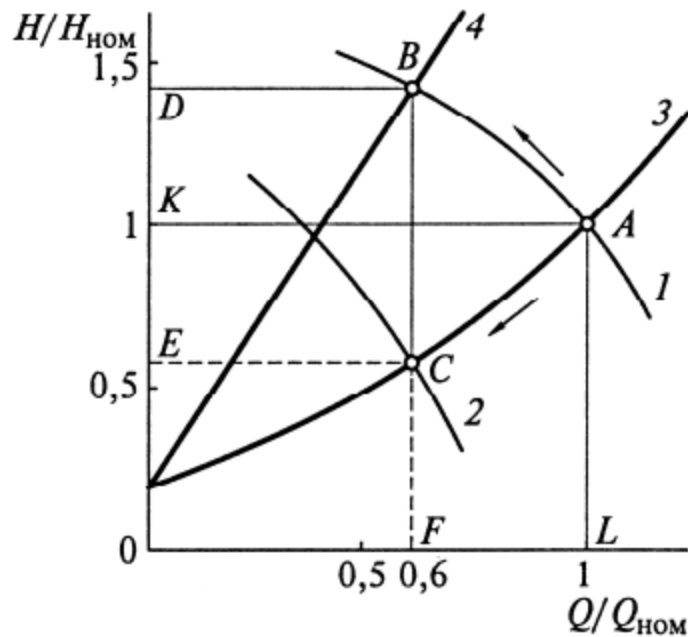


Рисунок 2.2 – Характеристики продуктивності відцентрового насоса при дросельному та частотному регулюванні

Значення витрат і напору води приведені на рис. 2.2 у відносних одиницях при використанні в якості базових величин номінальних витрат $Q_{\text{ном}}$ і номінального напору $H_{\text{ном}}$. При номінальних витратах і напоріві, насос працює в точці А, а потужність, споживана насосом, пропорційна площі прямокутника $OKAL$. Зі зменшенням витрат при нерегульованому електроприводі (на рис. 2.2 для прикладу показані витрати води, що становлять $0,6Q_{\text{ном}}$) за рахунок дросельного регулювання відбуваються зміни опору магістралі (крива 4), насос працює в точці В кривій 1, що призводить до зростання напору, який стає

більше ніж номінальний, а потужність насоса пропорційна площі прямокутника $0DBF$, несуттєво відрізняється від потужності, що споживається при номінальних витратах води, відповідно й енергоспоживання при зменшених витратах змінюється несуттєво або практично не змінюється.

Отже, приведені міркування об'єктивно підтверджують необхідність переходу від систем дросельного регулювання насосних агрегатів до систем автоматичного регулювання, шляхом автоматичного підтримування необхідного технологічного параметра, зокрема, напору (тиску) при змінних витратах води за рахунок використання частотно-регульованих електроприводів [11].

Можливості енергозберігаючого управління при розрегулюванні швидкості електроприводу в порівнянні з дросельним регулюванням проілюстровані на рис. 2.2. За рахунок зменшення швидкості насос працює при зниженні витрат води в точці C на кривій 2 при постійній характеристиці магістралі (крива 3). Потужність, що споживається електроприводом в цьому випадку, пропорційна площі прямокутника $0ECF$, що наочно ілюструє можливість зниження енергоспоживання за рахунок впровадження регульованих електроприводів насосів. Поряд з цим зменшується при зниженні витрат води і напір в системі, що призводить до зменшення витрат (витоків) води [12].

Приведемо методики для наближеної порівняльної оцінки енергоспоживання при зміні подачі відцентрових насосів за рахунок дросельного регулювання (ДР) та частотного регулювання (ЧР) швидкості АД насосу [13].

Як показано вище, ustalений режим роботи насосної установки при постійній швидкості провідного електродвигуна визначається точкою перетину характеристик насосу, що відповідає цій частоті й характеристики магістралі, підключеної до насосу.

Характеристикою насоса є залежність напору H від витрат Q , яку з достатнім ступенем точності можна представити у вигляді:

$$H = H_{0н} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - CQ^2, \quad (2.3)$$

де $H_{0н}$ – напір насосу при $Q = 0$ и $\omega = \omega_{ном}$; $\omega_{ном}$ – номінальна швидкість електродвигуна; C – конструктивний коефіцієнт насосу, $C = (H_{0н} N_{ном}) / Q_{ном}^2$; $Q_{ном}$ і $N_{ном}$ – номінальні витрати і напір.

Характеристика магістралі визначається за таким виразом:

$$H = H_c + RQ^2, \quad (2.4)$$

де H_c – статичний напір (протитиск), що відповідає $Q=0$ (закритій засувці); Γ – коефіцієнт опору магістралі, $\Gamma = (N_{ном} H_c) / Q_{ном}^2$.

Характеристики способів регулювання відцентрового насосу й магістралі приведені на рис. 2.3.

Потужність, що потрібна установці з мережі:

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

Регулювання подачі дросельною засувкою оснований на зміні опору магістралі. У цьому випадку при $\omega = \omega_{ном} = \text{const}$ робоча точка механізму переміщається по Q - H -характеристиці, що відповідає номінальній швидкості двигуна, в сторону зниження подачі до точки перетину з новою характеристикою магістралі (точки 1, 2, 3 на рис. 2.3).

При електричному способі регулювання подачі робоча точка переміщається за незмінною характеристикою магістралі (точки 4, 5, 6, 7 на рис. 2.3). При цьому зі зменшенням подачі зменшується і потрібний напір, що призводить до зниження статичної потужності, необхідної для роботи насоса з заданою витратою води, порівняно з дросельним регулюванням.

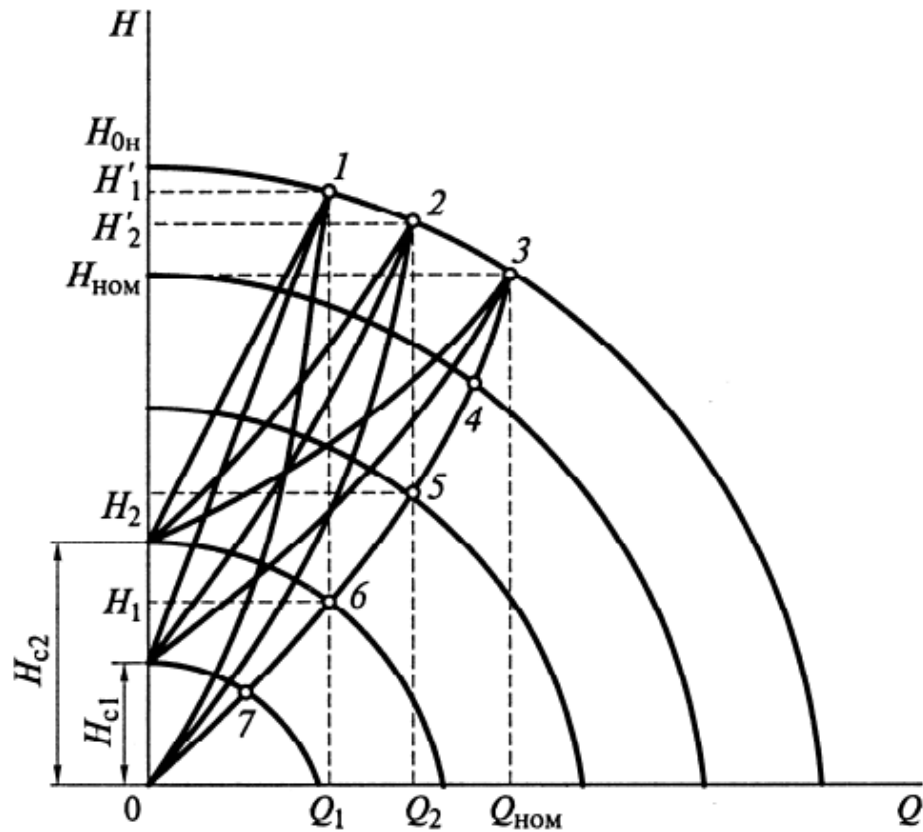


Рисунок 2.3 – Характеристики способів регулювання відцентрового насоса: 1, 2, 3 – робочі точки при дросельному регулюванні подачі; 4, 5, 6, 7 – робочі точки при регулюванні подачі за рахунок зміни частоти обертання двигуна

Розглянемо ККД двигуна при різних способах регулювання подачі без врахування втрат у сталі і втрат від струмів неробочого ходу.

При частотному керуванні, що здійснюється при постійності абсолютного ковзання:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} (1 + a)}, \quad (2.5)$$

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 засувкою, коли $\omega = \omega_{ном} = \text{const}$, ККД двигуна постійний і обчислюється по формулі:

$$\eta_1 = (1 - S_{ном}) / (aS_{ном} + 1). \quad (2.6)$$

Щоб отримати розрахункові вирази у функції від витрат, ковзання двигуна можна виразити через расход. Для цього у формулі (2.3) замінимо $(\omega/\omega_{ном})^2$ на $[(1-S)/(1-S_{ном})]^2$ і, вирішивши його разом з виразом (2.4) щодо S , отримаємо

$$S = 1 - (1 - S_{ном}) \sqrt{h_c + Q_*^2 (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{ном}) A, \quad (2.7)$$

где $h_c = H_c / H_{0н}$; $Q_* = Q_{ном}$; $A = \sqrt{h_c + Q_*^2 (1 - h_c)}$.

Залежність вираженого в відносних одиницях моменту на валу турбомеханізму при роботі його на мережу з постійними параметрами має вигляд:

$$\mu = \mu_{0c} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \frac{\omega}{\omega_{ном}} \sqrt{\frac{(\omega/\omega_{ном})^2 - h_c}{1 - h_c}}, \quad (2.8)$$

де μ – відносний момент на валу турбомеханізму, $\mu = M/M_{сmax}$ ($M_{сmax}$ – максимальний статичний момент на валу механізму, котрий має місце при $\omega = \omega_{ном}$); μ_{0c} – статичний момент на валу (M_{0c}) при $Q_* = 0$ (закрита засувка), виражений у відносних одиницях, $\mu_{0c} = M_{0c}/M_{сmax}$.

Вирази (2.6) і (2.8) дозволяють виразити момент, ККД, швидкість і потужність, що споживається з мережі, у функції від витрати води при заданому протитиску. Для універсального використання розрахункових формул доцільно визначати потужність P_1 в відносних одиницях ($P_1^* = P_1/P_6$), прийнявши

в якості базового значення потужності P_1 максимальну статичну потужність на валу двигуна $\omega = \omega_{\text{ном}}$, тобто $P_6 = P_{\text{стmax}} = M_{\text{стmax}}\omega_{\text{ном}}$.

Якщо вважати, що $M_{\text{стmax}} = M_{\text{ном}}$ ($M_{\text{ном}}$ – номінальний момент двигуна, $M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}}$), то базова потужність $P_6 = P_{\text{ном}}$.

Вирази для розрахунку P_1^* при різних способах розрегулювання подачі насосу приймають такий вигляд:

при дросельному регулюванні

$$P_{1^*} = \frac{[\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c})Q_*](1 + aS_{\text{ном}})}{1 - S_{\text{ном}}}, \quad (2.9)$$

при частотному регулюванні

$$P_{1^*} = [\mu_{0c}A^3 + (1 - \mu_{0c})A^2Q_*] \left[1 + \frac{S_{\text{ном}}(1 + a)}{(1 - S_{\text{ном}})A} \right]. \quad (2.10)$$

Вирази (2.9) і (2.10) дозволяють розрахувати споживану насосом потужність при дросельному і частотному регулюванні в залежності від витрат рідини Q^* і провести порівняльну оцінку способів регулювання.

Як впливає з (2.9) і (2.10), при дросельному регулюванні для заданого значення Q^* необхідна потужність P_1^* залежить від μ_{0c} , а, при частотному регулюванні - від h_c , μ_{0c} , а, $S_{\text{ном}}$. Задаючи ці параметри для конкретних умов роботи нашого агрегату і обраного двигуна, можна розрахувати значення $P_{1^*} = f(Q^*)$.

У табл. 2.1 наведено відносні значення споживаної потужності P_1^* у функції відносних витрат Q^* для дросельного і частотного регулювання при $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{\text{ном}} = 0,04$.

Використовуючи формули (2.9) і (2.10), можна отримати залежності, що ілюструють виграш у споживаній активній енергії при частотному регулюванні порівняно з дросельним регулюванням.

Для оцінки впливу початкового статичного моменту (μ_{0c}) на потрібну потужність в таблиці 2.2 приведені залежності. $P_1^* = f(Q^*)$ для дросельного і частотного регулювання при $\mu_{0c} = 0$ і $h_c = 0$.

Таблиця 2.2

Споживана електроприводом відцентрового насоса потужність для різних способів регулювання при початковому статичному моменті $\mu_{0c}=0$ й статичному напорі води $h_c=0$

Спосіб регулювання	Q^*					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
P_1^* при дросельному регулюванні	0	0,22	0,44	0,66	0,88	1,08
P_1^* при частотному регулюванні	0	0,01	0,08	0,24	0,56	1,08

Порівнюючи дані табл. 2.1 і 2.2, бачимо, що при зниженні μ_{0c} вираш споживаної потужності при використанні частотно-регульованих електроприводів зменшується.

Приведені вище вирази отримані в припущенні, що ККД залишається незмінним при всіх режимах роботи. На самій справі ККД наразі менше одиниці і знижується практично при будь-яких відхиленнях від номінального режиму роботи.

Зазначимо, що при вентиляторному моменті статичного навантаження (при $\mu_{0c} = 0$ і квадратичної залежності μ від швидкості) відносні знаки потужності на валу двигуна (при використанні в якості базових одиниць їх номінальних значень) можуть бути виражені в функції кутової швидкості наступними виразами:

$$\begin{aligned}
 Q_* &= \frac{Q}{Q_{\text{ном}}} = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}; \\
 H_* &= \frac{H}{H_{\text{ном}}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2; \\
 M_* &= \frac{M}{M_{\text{ном}}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2; \\
 P_{\text{мех}*} &= \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ном}}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{мех}}} \right)^3,
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

де $\omega_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$, $P_{\text{ном}}$ – номінальні швидкість обертання, момент і потужність двигуна, відповідно. ККД насоса при цьому вважається постійним.

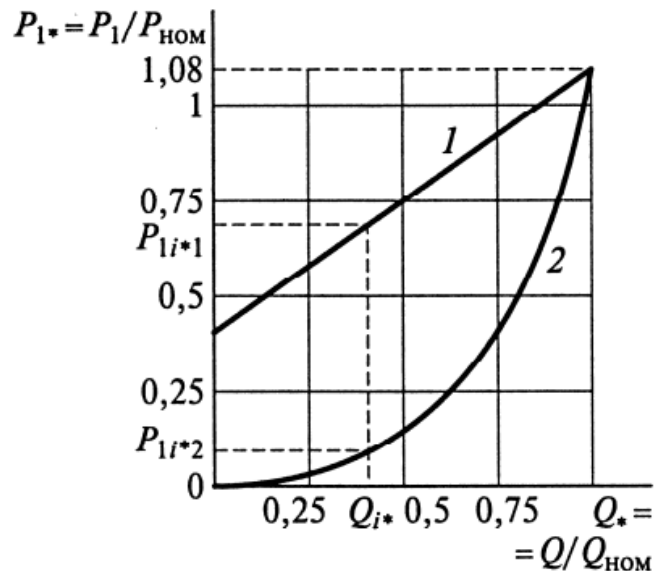


Рисунок 2.4 – Залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ при дросельному (крива 1) і частотному (крива 2) регулюванні

2.1.3 Особливості автоматизації електроприводу турбомеханізмів

Турбокомпресори займають серед турбомеханізмів друге місце після насосів по розповсюдженню в промисловості. Основна їх кількість це

вентилятори. Не зважаючи на відносно невелику потужність вентиляторів (до 100 кВт) на їх частку приходить значна сумарна споживана потужність.

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

Обмеження допустимої швидкості кінців лопаток робочого колеса змушує зі збільшенням діаметра колеса знижувати його номінальну частину обертання. Слід зазначити, що вентилятори мають великий момент інерції, іноді такий, що на порядок і більше перевищує момент інерції провідного двигуна, що суттєво ускладнює їх пук, а в деяких випадках гальмування для швидкої зупинки робочого колеса.

Вентилятори на відміну від інших турбомеханізмів завжди працюють на мережу без протитиску, внаслідок чого залежність моменту статичного опору на валу провідного двигуна від швидкості носить квадратичну залежність, а підведена потужність без врахування втрат на підшипниках, пропорційна кубу швидкості.

Аеродинамічна характеристика димососу типу ДН - 12,5-1 при регулюванні зміною кута θ_n повороту лопатей напрямного апарату й $n_{ном}=1000$ об/хв., показано на рис. 2.5. Очевидно, що при такому регулюванні подачі ККД вентилятора буде суттєво падати.

Достатньо економічним способом регулювання продуктивності турбокомпресорів є регулювання шибером перерізу вихідного каналу вентилятора, подібне до дросельного регулювання насосів.

При цьому відбувається не зміна характеристики вентилятора, як у попередньому випадку, а міняється характеристика магістралі, як це відбувається в сучасних установках.

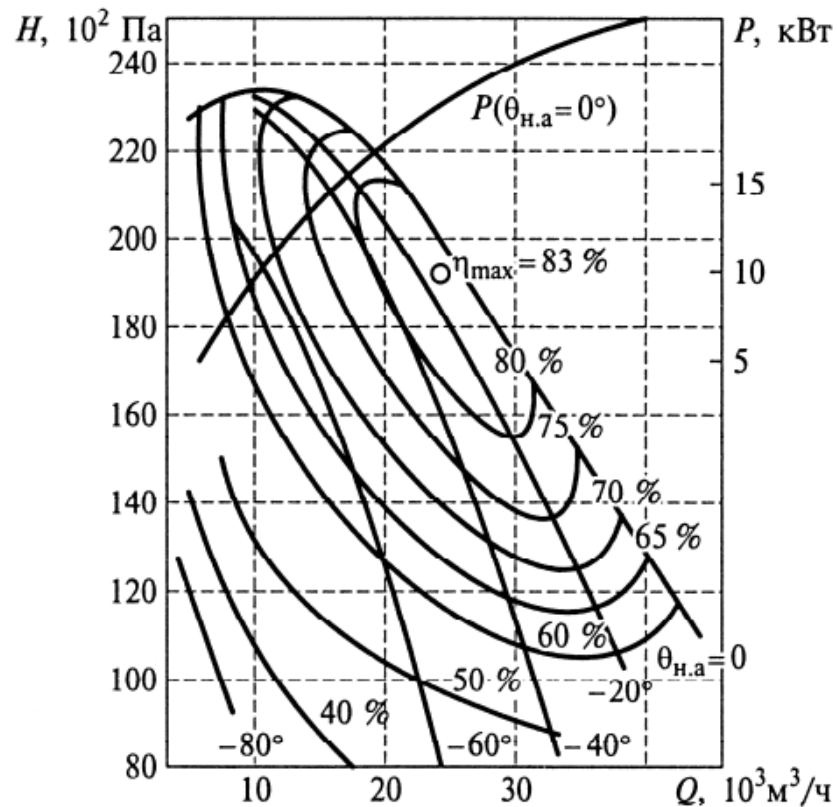


Рисунок 2.5 - Аеродинамічні характеристики димососу типу ДН - 12,5-1 при регулюванні напрямним апаратом і $n_{ном} = 1000$ об / хв.

Якщо подачу вентилятора регулювати зміною швидкості, то характеристика мережі відповідає формулі (2.3) при $h_c = 0$, тобто $H = kQ^2$, а ККД вентилятора залишається постійним.

Потужність, споживана з мережі двигуном вентилятора (без ККД вентилятора), можна оцінити за виразами, отриманими з (2.9) і (2.10) при $h_c = 0$ і $\mu_0 c = 0$. Так, при регулюванні шиббером:

$$P_{1*} = \frac{1 + aS_{ном}}{1 - S_{ном}} Q_*^3, \quad (2.12)$$

а при частотному регулюванні:

$$P_{1*} = Q_*^3 + \frac{S_{ном}(1+a)}{1-S_{ном}} Q_*^2. \quad (2.13)$$

Залежності споживаної потужності, побудовані за формулами (2.12) і (2.13), показані на рис. 2.6. Пунктирною лінією дано графіки потужності двигуна з урахуванням ККД вентилятора. На рис. 2.6 видно, що необхідна потужність з частотно-регульованим електроприводом вентилятора значно нижче, ніж при регулюванні шибром, майже за будь-яких значень витрат Q_* , за винятком знаходження робочої точки в околі номінального режиму.

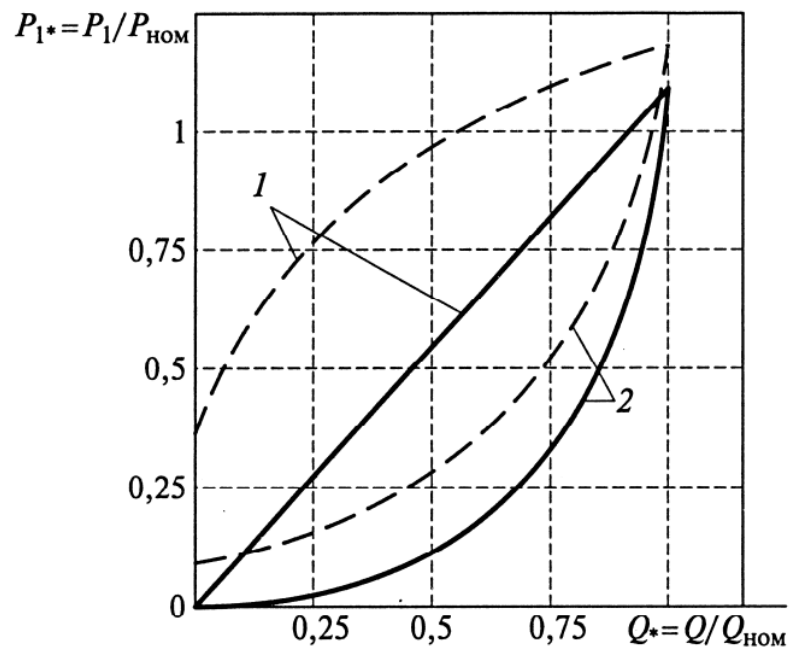


Рисунок 2.6 - Залежності зміни споживаної потужності електроприводом турбокомпресора, при регулюванні шибром (1) і частотному регулюванні (2)

Осьові вентилятори [14] мають характеристики, показані на рис. 2.7, які за формою відрізняються від характеристик відцентрових машин. Відмінність полягає в тому, що ліва частина характеристик осьового вентилятора має провали і є нестійкою, саме тому, його робота можлива лише в околі нижчому від граничного напору. Права (робоча) частина характеристики осьових машин круто падаюча.

Регулювання подачі осьових вентиляторів здійснюється зміною кута установки лопаток робочого колеса. Зазвичай поворот лопаток здійснюється 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 суттєво ускладнюють конструкцію вентилятора і знижують його надійність.

Криві ККД осьового вентилятора (див. рис. 2.7) при регулюванні поворотом лопаток розподіляються перпендикулярно характеристиками $H=f(Q)$. Наприкінці графічної залежності ККД помітно падає, в той час як у відцентрових машин криві рівні ККД при регулюванні наповнюючим апаратом розподіляються паралельно характеристикам $H=f(Q)$.

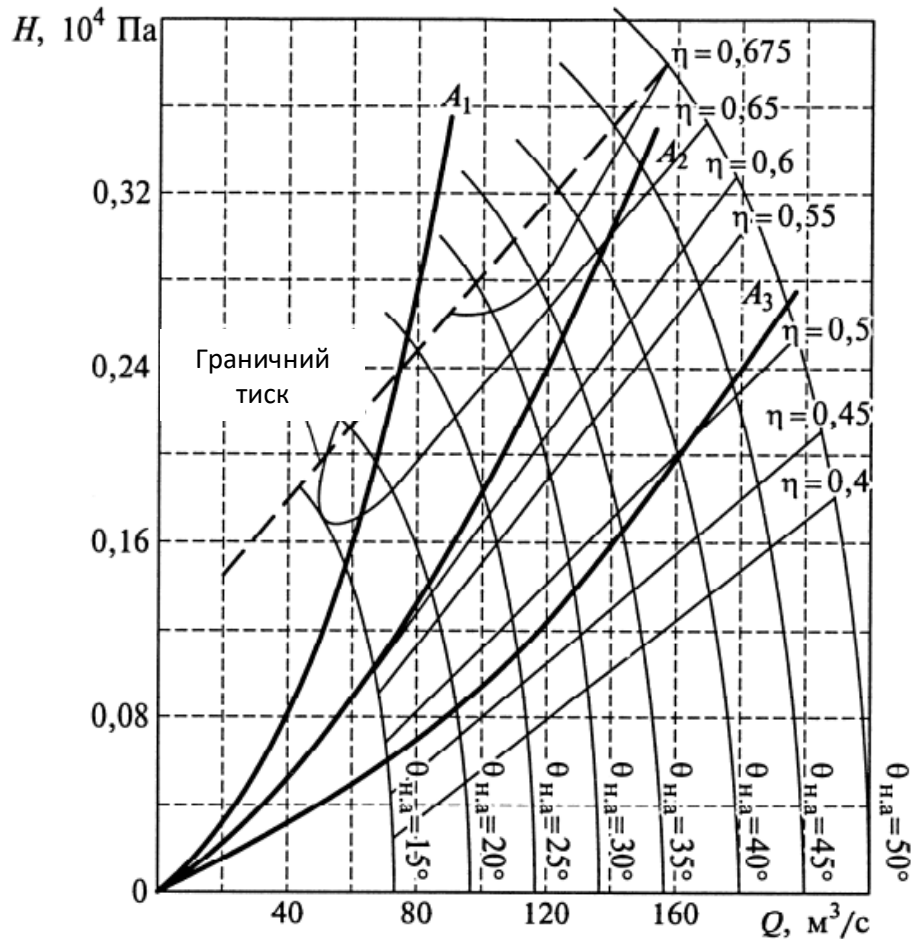


Рисунок 2.7 - Експлуатаційні характеристики турбокомпресора серії В

Регулювання продуктивності осьового турбокомпресора зміною швидкості двигуна пов'язано з певними труднощами, яких немає у

відцентровних машинах. Якщо встановити кут повороту лопаток рівним, наприклад, $\theta_{н.а} = 47^\circ$, то робота на мережу з характеристикою, такою як OA_1 , (див. рис. з будь-якою характеристикою, що проходить лівіше OA_2 , виявиться неможливою, так як вентилятор потрапляє в зону нестійкої роботи.

Робота на мережу з характеристикою, що лежить зправа OA_2 , наприклад OA_3 , неекономічна, так як незважаючи на регулювання швидкості ККД вентилятора не перевищить 50%. Тому зона раціональної роботи осьового вентилятора з перегулюванням тільки швидкості досить вузька і в ряді випадків вимагається комбіноване регулювання: періодично, при значних змінах характеристики мережі за допомогою повороту лопаток з одночасною зміною у невеликому діапазоні зміни лише швидкості. Враховуючи сказане, до регулювання осьових вентиляторів потрібно підходити більш уважно, ніж до регулювання відцентрових, проводячи попередній аналіз та моделювання можливих режимів роботи.

Особливе значення для ряду турбокомпресорів має застосування регульованого електроприводу, так як ККД регульованого електроприводу більше, ніж при нерегульованому, в середньому на 12% [15]. Крім підвищення ККД застосування регульованого приводу дозволяє в деяких випадках спростити конструкцію турбомашин, виключивши напрямний апарат, забезпечуючи одночасну роботу двох і більше агрегатів.

Потужність турбокомпресорів досягає 18000 кВт, а в перспективі досягне 25 000 кВт і більше. Ці машини призначені для підвищення тиску газу і транспортування його по магістральним трубопроводам.

Турбокомпресори в залежності від ступеня стиснення газу розділяються на повітрעדувки зі ступенем стиснення нижче 1,15; нагнітачі - ступінь стиснення яких вище 1,15; компресори, що представляють собою машини зі ступенем стиснення газу більше 1,15.

До типових областей застосування турбокомпресорів відносяться - генерування пневматичної енергії (енергетичні турбокомпресори); транспортування газу по магістральним газопроводам; стиснення повітря для

отримання кисню методом розділення; подача повітря і кисню в доменні печі, холодильна техніка.

Регулювання продуктивності турбокомпресорів здійснюється в основному дроселюванням на боці нагнітача, ККД при такому регулюванні буде вище, ніж при дроселюванні, однак застосування наповнюючого апарату суттєво ускладнює конструкцію турбокомпресора і знижує його надійність. Найбільш досконалим способом регулювання продуктивності турбокомпресорів є зміна швидкості їх приводних двигунів [16].

Характеристики турбокомпресора типу К-3250-41-1 при різних частотах обертання показані на рис. 2.8.

Особливість роботи турбокомпресорів полягає в тому, що кожній частоті обертання відповідає певна критична подача машини, нижче якої її робота стає нестійкою. Причиною нестійкої роботи турбокомпресорів є повторюваний зрив потоку з робочих і напрямних лопаток, що призводить до сильних пульсацій тиску, а також до систематичного відкривання і закривання зворотного клапана і виникненню аварійних коливань в системі. Такий режим називається помпажним. Робота турбокомпресорів в режимах лівіше межі помпажу (пунктирна лінія на рис. 2.8) неприпустима. Відзначимо, що зі зменшенням частоти обертання області помпажних режимів скорочується, внаслідок чого при регулюванні шляхом зміни частоти обертання можлива робота турбокомпресора зі зниженою подачею.

Технологічна необхідність розрегулювання подачі турбокомпресорних машин пов'язана з їх призначенням. Так, режим роботи нагнітачів магістральних газопроводів визначається графіком споживання газу на кінці газопроводу. Завданням регулювання подачі компресорів в даному випадку є забезпечення транспортування необхідної кількості газу при мінімальних енергетичних витратах. При скороченні споживання газу необхідно зниження його подачі для уникнення зайвого підвищення тиску в трубопроводі. Так як турбокомпресори на магістральних газопроводах об'єднуються в станції, що складаються з кількох послідовно і паралельно працюючих компресорів, то

регулювання подачі газу ведеться ступінчасто: зміною числа робочих машин. Для плавного регулювання цей метод доповнюється розподілом на стороні нагнітання.

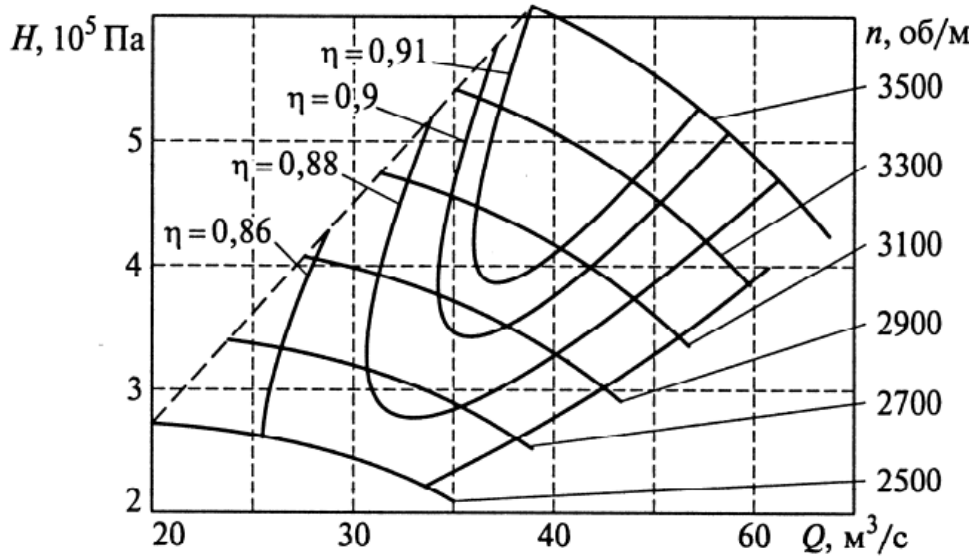


Рисунок 2.8 - Характеристики турбокомпресора типу К-3250-41-1 при різних частотах обертання

2.2 Висновки за розділом

1. Проведений аналіз впливу зміни навантаження на втрати в електроприводі насосної установки. Встановлено, що постійні втрати асинхронного електроприводу не залежать від його навантаження і залишаються практично незмінними при незмінній швидкості. Разом з тим змінні втрати, до яких віднесені втрати в меді статора і ротора, залежать від навантаження.

2. Аналітично визначено, що середньодобове завантаження насосів гарячого водопостачання становить 50 ... 55% від максимального значення. Тому існуючі системи теплопостачання з нерегульованим електроприводом не забезпечують ефективного зниження споживаної потужності в процесі зменшення витрат води, а також створюють при цьому надлишковий тиск води в гідросистемі, що спричиняє витіки води і несприятливо впливає на роботу технологічного обладнання й мереж водо і теплопостачання.

3. Найбільш доцільним, з точки зору економії електроенергії та точності відпрацювання технологічних параметрів, є асинхронний електропривод із скалярним керуванням.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

3.1 Математичне моделювання ЕП гідронасосу і його параметрів

Для визначення кутової швидкості обертання ведучої шестерні, при взаємодії потоку рідини варто використати теорему про зміну кінетичної енергії механічної системи [18], тоді вираз у кінцевій формі матиме вигляд:

$$\frac{J\omega^2}{2} - \frac{J\omega_0^2}{2} = \sum M_i, \quad (3.1)$$

де J – момент інерції шестерні ; ω і ω_0 – відповідно, кутові швидкості шестерні в момент часу t і t_0 ; M – момент зовнішніх сил або сила тиску потоку рідини діючих зубців шестерні, що призводить до його обертання.

Різниця часу виразимо

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t},$$

де $\Delta\theta$ - відповідає, куту повороту зуба за проміжок часу Δt ; T - витрачений час на один оборот зуба.

Звідси маємо:

$$\Delta t = \frac{T}{2\pi} \Delta\theta = \frac{1}{\omega} \Delta\theta \quad (3.2)$$

Використавши формулу (3.2) підставивши (3.1) отримаємо:

$$\frac{J\omega^2}{2} - \frac{J\omega_0^2}{2} = \frac{1}{2}n\rho h \left[\frac{1}{2}v^2(r_e^2 - r_i^2) - \frac{2}{3}v \sin \theta \omega_0 (r_e^3 - r_i^3) + \frac{1}{4}\omega_0^2(r_e^4 - r_i^4) \right], \quad (3.3)$$

Таким чином, визначення кутової швидкості ω буде продовжуватися, поки не прийме єдине значення:

$$\omega = \left\{ \omega_0^2 + \frac{n\rho h}{J} \left[\frac{1}{2}v^2(r_e^2 - r_i^2) - \frac{2}{3}v \sin \theta \omega_0 (r_e^3 - r_i^3) + \frac{1}{4}\omega_0^2(r_e^4 - r_i^4) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

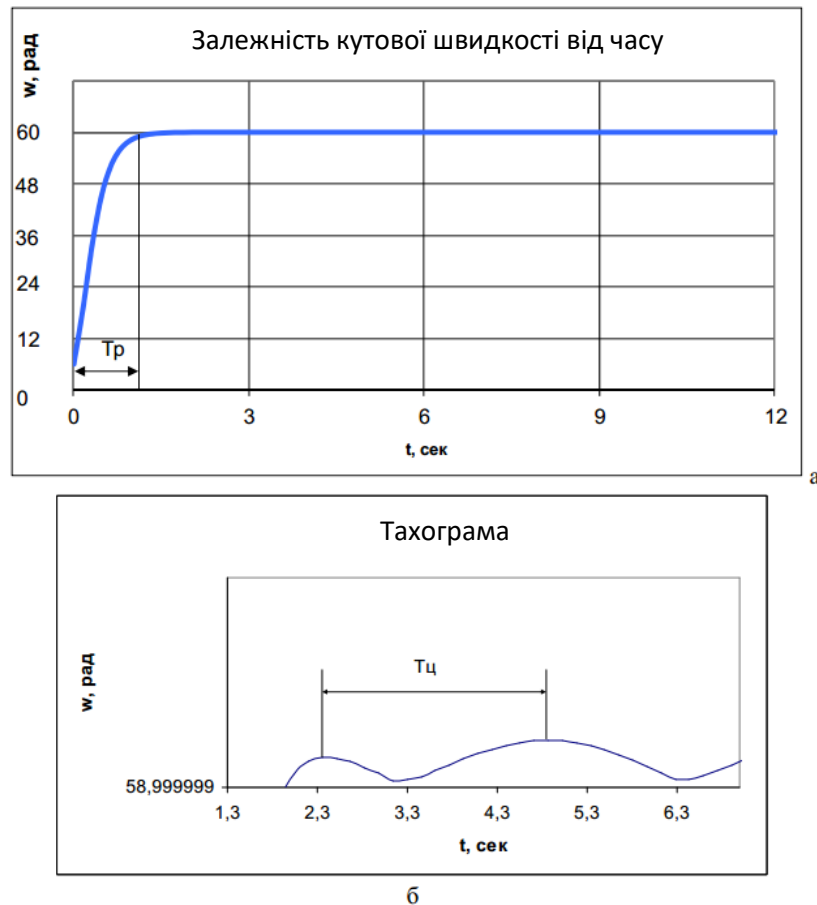


Рисунок 3.1 - Графік залежності кутової швидкості привода від часу:
 а - залежність кутової швидкості вала гідромотора від часу, б – тахограма процесу

- блок керування перетворювачем, що включає формувач 3-фазної системи керуючих напруг u_{1a} , u_{1b} і u_{1c} ;
- формувач 6-канального ШІМ-сигналу і блок драйверів;
- формувач $2U_f$ - характеристики;
- датчики в схемі лінійного струму двигуна;
- блок розрахунку фактичного значення фазного струму двигуна;
- елемент порівняння допустимого максимального та фактичного значення діючого фазного струму двигуна та регулятор обмеження струму;
- блок компенсації ковзання;
- блок корекції управління напругою інвертора у функції фактичного значення напруги ланки постійного струму U_d перетворювача.

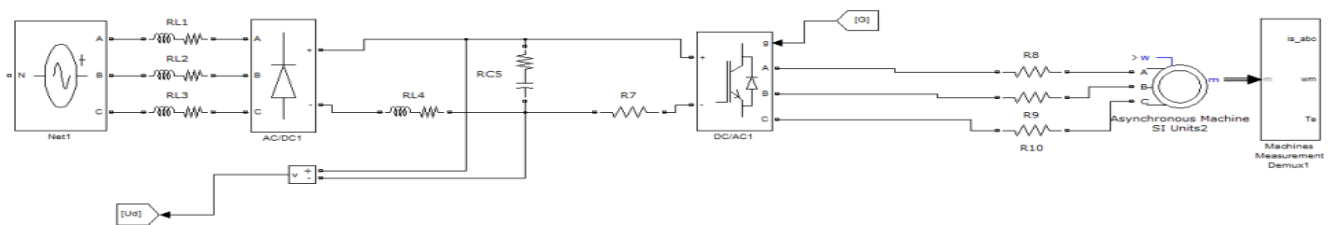


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель електричної частини силового каналу

Імітаційна модель рис. 3.3 складається з джерела змінного струму, вхідного дроселя, випрямляча, RC фільтра, інвертора, провідників з їх опорами та бібліотечної моделі асинхронного двигуна.

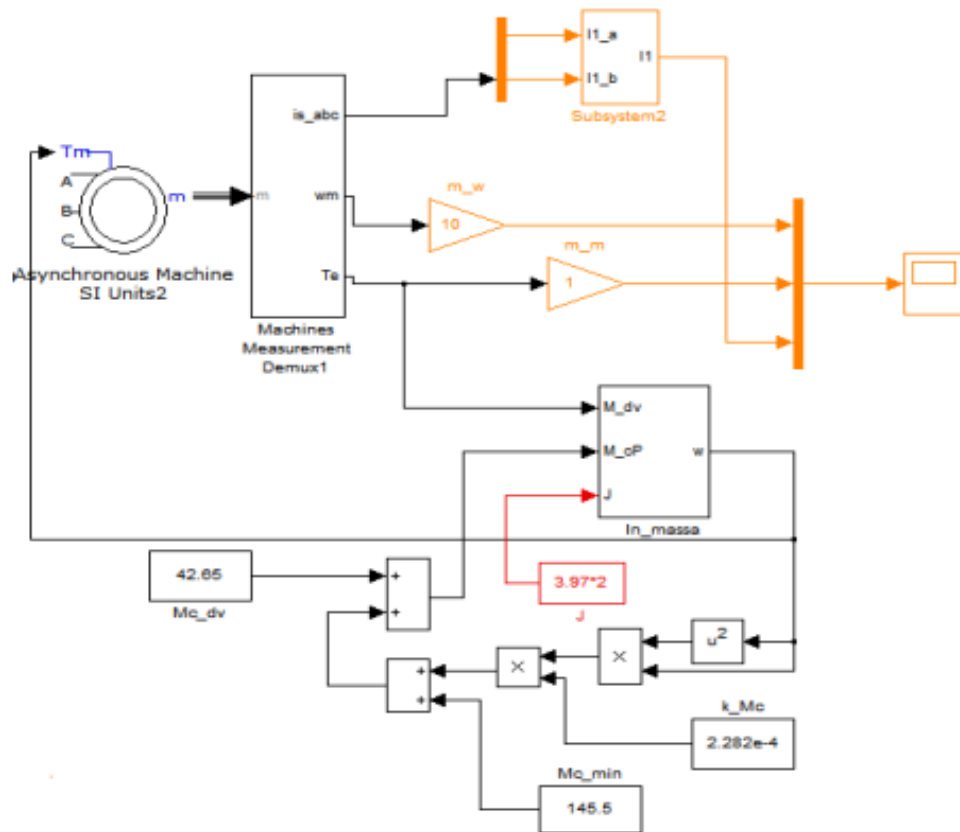


Рисунок 3.4 – Імітаційна модель механічної частини силового каналу системи перетворювач частоти – асинхронний електродвигун з насосним навантаженням для багатоповерхового будинку

3.3 Імітаційна модель одномасової механічної системи з реактивним навантаженням

Імітаційна модель блоку одномасової механічної системи з моментом навантаження реактивного характеру, що використовується при моделюванні систем електроприводу, представлена на рис.3.5

На схемі прийняті наступні додаткові позначення:

Мем - електромагнітний момент двигуна;

МсР – приведений до вала двигуна статичний момент реактивного характеру, Н*м;

Je – приведений до вала двигуна еквівалентний момент інерції мас, що рухаються поступально та обертаються, кг м².

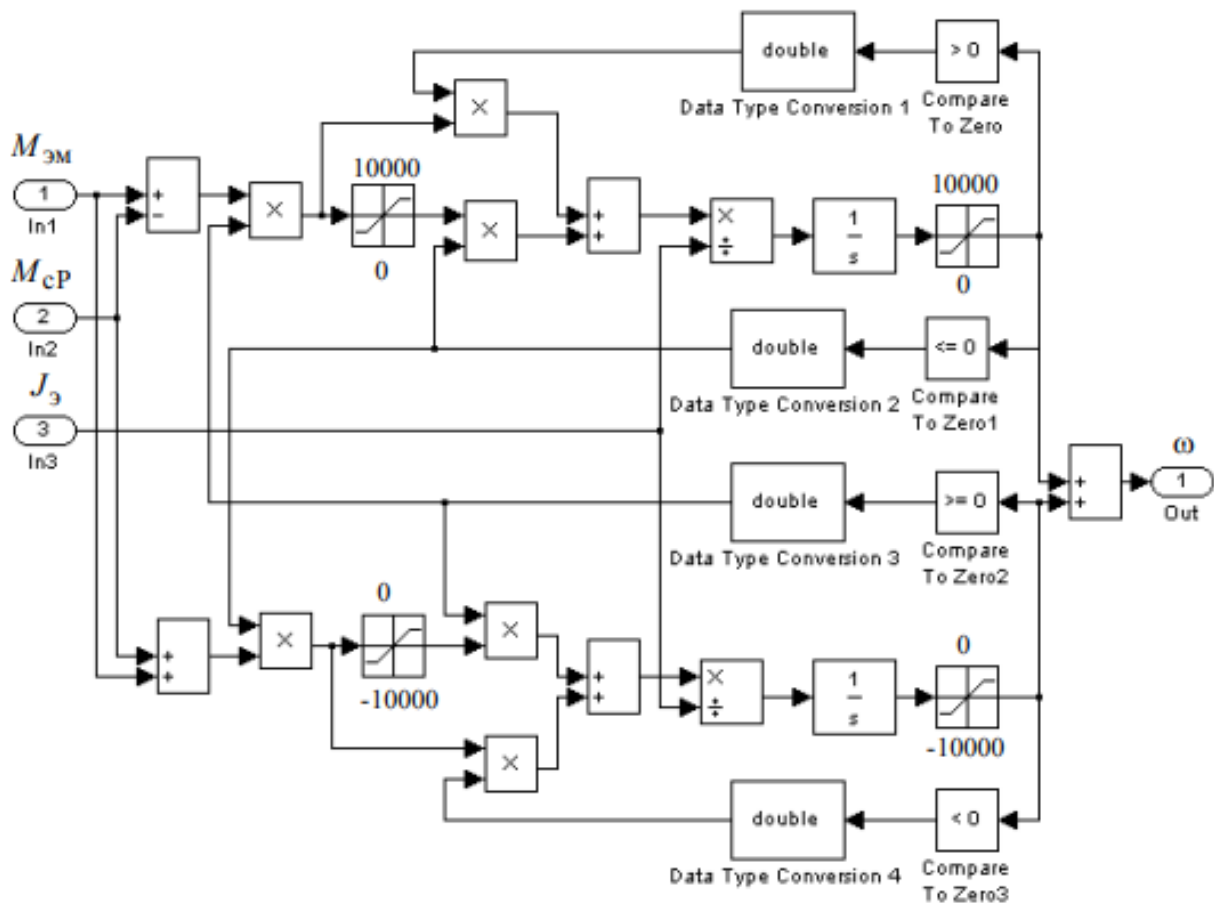


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель одномасової механічної системи з реактивним навантаженням

3.4 Імітаційна модель задатчика інтенсивності з S-подібною характеристикою

Схема набору імітаційної моделі задатчика інтенсивності з S-образною вихідною характеристикою представлена на рис.3.5. Параметри налаштування імітаційної моделі задатчика інтенсивності з S-образною характеристикою визначаються за виразами:

$$T_{н1} = t_1, c \quad T_{н2} = t_1 + t_2, c$$

$$k = 0,5 \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (3.5)$$

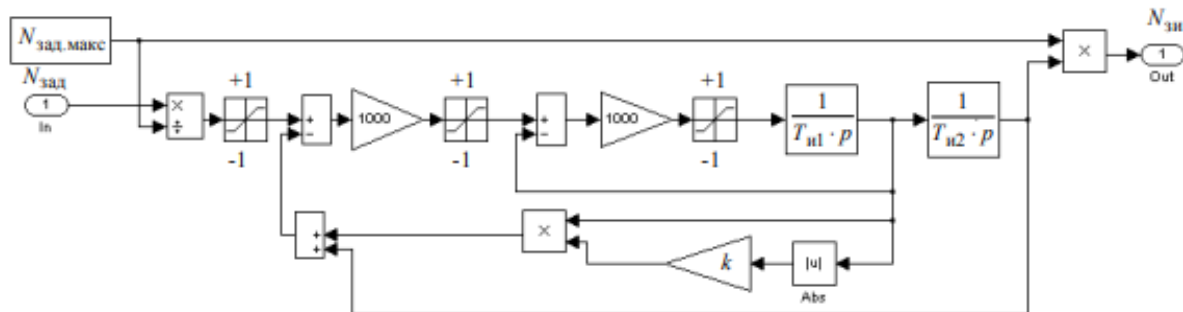


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель задатчика швидкості з S – подібною характеристикою

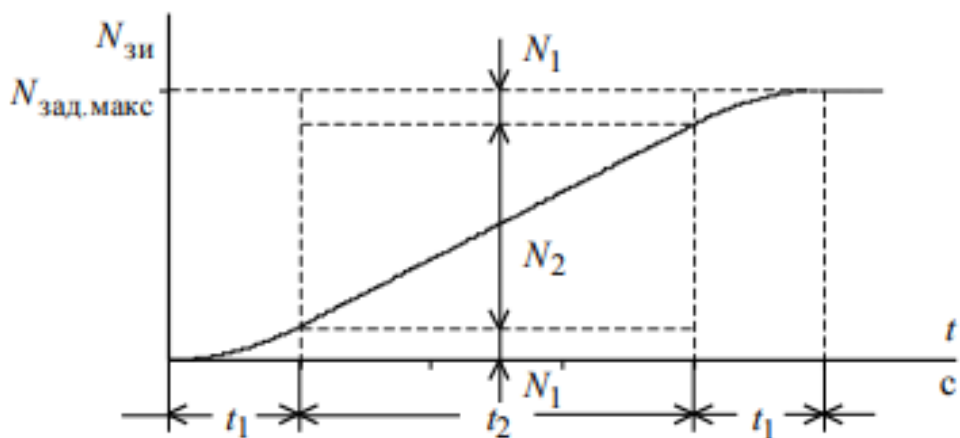


Рисунок 3.7 – Часова діаграма імітаційної моделі задатчика швидкості з S – подібною характеристикою

3.5 Імітаційна модель завдання на силовий канал системи перетворювач частоти – асинхронного електродвигуна

В імітаційній моделі зображеній на рис.3.8 відбувається формування завдання зміну вихідній частоти з перетворювача.

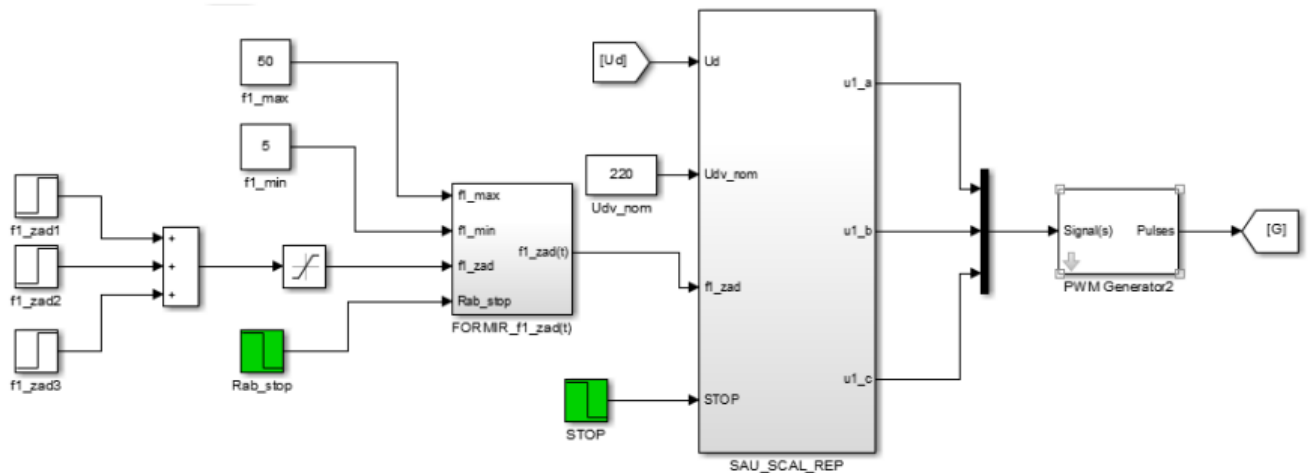


Рисунок 3.8 – Імітаційна модель завдання на силовий канал системи перетворювач частоти – асинхронного електродвигуна

У блоці SAU_SCAL_REP реалізовано скалярне управління, а також налаштування вольт-частотних характеристик за допомогою компенсації напруги на низьких частотах до 30 Гц.

За допомогою блоку FORMIR_f1_zad(t) реалізується задатчик швидкості з S – подібною характеристикою.

За допомогою імітаційної моделі отримуємо динамічні характеристики представлені рис. 3.9 та 3.10.

На рис.3.9 представлені діаграми відпрацювання електроприводом насоса ступінчастого циклу з компенсацією за напругою.

Компенсація дозволяє працювати відповідно до заданих вимог приводу насоса подачі теплоносія в багатоповерховий будинок. У циклі роботи приводу простежується змінне навантаження, що відповідає навантажувальній характеристиці насосу.

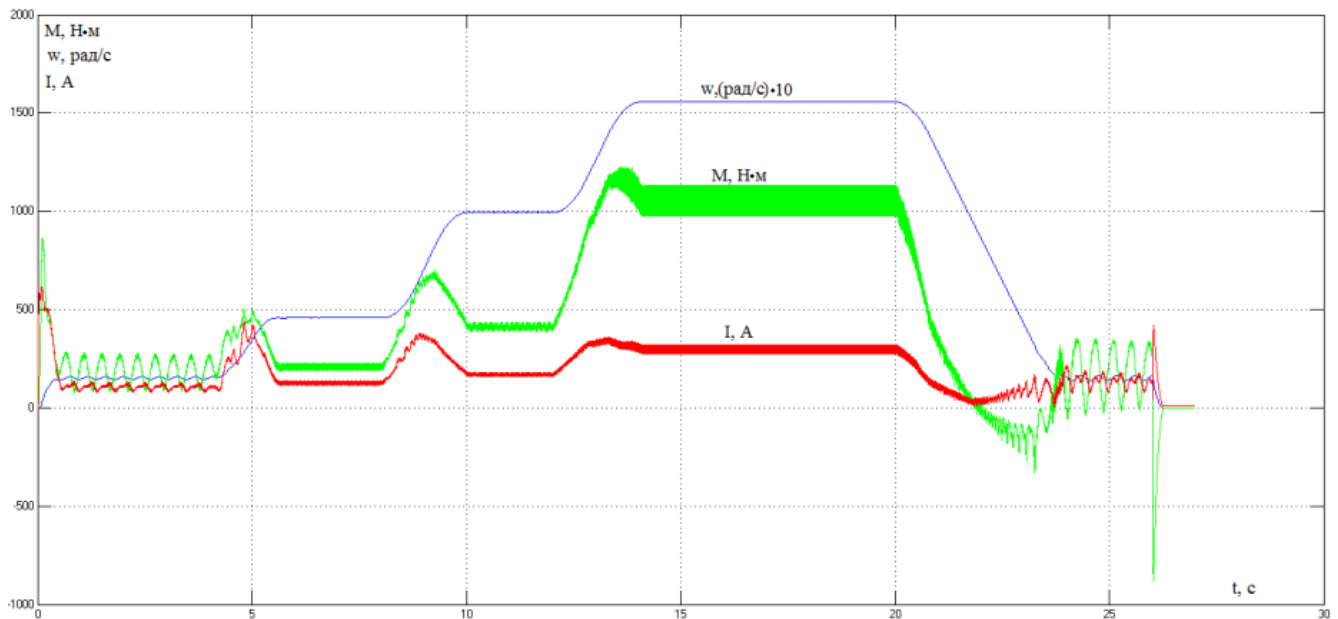


Рисунок 3.9 – Діаграми відпрацювання електроприводом насоса ступінчастого циклу: 5 Гц, 15 Гц, 25 Гц, 50 Гц; та повна зупинка у разі потреби

Цикл роботи починається із запуску електродвигуна на частоту 5 Гц при цьому продуктивність насоса дорівнюватиме нулю, робота на цій швидкості потрібна нам щоб тримати заданий напір у нагнітальній трубі до тих пір поки не закриється засувка, інакше цей стовп зіллється назад з наступним заклинюванням. Протягом 4 секунди відбувається розгін до 15 Гц., що відповідає мінімальній продуктивності насоса і подачі теплоносія, котрий обертається, в 8 секунд починається розгін двигуна на частоту 25 Гц при цій частоті обертання двигуна насос робить подачу і проміжний розгін електродвигуна на частоту до 50 Гц. При цій швидкості обертання електродвигуна насос працює з продуктивністю 100% та здійснює подачу теплоносія. Після відпрацювання на 50 Гц в 20 секунд забезпечується номінальний режим подачі теплоносія. САК передбачено робочий стоп і повний зупинка електроприводу в разі потреби.

На рис.3.10 представлені діаграми відпрацювання електроприводом насоса робочого стопа без компенсації частот вольт-частотних характеристик, з

яких видно, що без компенсації по напрузі при низьких частотах двигун не утримує момент навантаження.

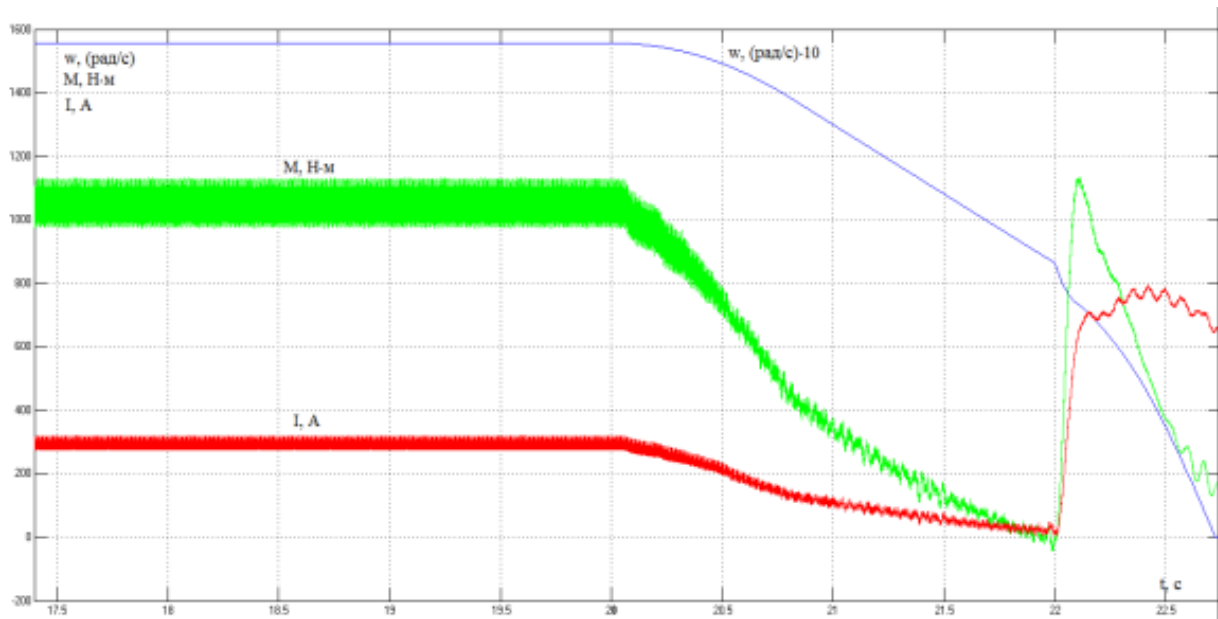


Рисунок 3.10 – Діаграми відпрацювання електроприводом насоса програми пуску без компенсації вольт-частотних характеристик

3.6 Розроблення двоконтурної системи стабілізації тиску насосом

Внутрішній контур швидкості та зовнішній - тиску, настроюється на стандартний оптимальний перехідний процес, що дозволяє стабілізувати вибраний параметр (швидкість) з високою точністю і, тим самим підвищити стабільність роботи електроприводу в цілому.

Розглянемо двоконтурну систему стабілізації тиску. Передавальна функція розімкненого контуру швидкості може бути записана так:

$$W_c(p) = \frac{K_{пч}}{T_\mu p + 1} \cdot \frac{\beta}{1 + \frac{\beta}{(T_a \cdot p + 1) \cdot J_p}} \cdot \frac{K_{дс}}{T_{дс} p + 1} \quad (3.6)$$

Враховуючи, що $T_{\mu c} = T_\mu + T_{дс} \approx T_a \ll T_c$, ними можна нехтувати. Тоді:

$$W_c(p) = \frac{K_{пч} \cdot K_{дс} \cdot \frac{\beta}{J_p}}{1 + \frac{\beta}{J_p}} = \frac{K_{пч} \cdot K_{дс}}{1 + \frac{J_p}{\beta}} \quad (3.7)$$

Синтезуючи регулятор швидкості в процесі настроювання на модульний оптимум, можна отримати передатвальну функцію вигляду:

$$W_c(p) = \frac{1 + \frac{J_p}{\beta}}{2T_{\mu c} \cdot K_{пч} \cdot K_{дс} p} = \frac{J}{2T_{\mu c} \cdot K_{пч} \cdot K_{дс} \cdot \beta} + \frac{1}{2T_{\mu c} \cdot K_{пч} \cdot K_{дс}} \cdot \frac{1}{p} \quad (3.8)$$

де $K_{дс} = \frac{U_{осmax}}{\omega_0} = \frac{10}{157} = 0,064$ – коефіцієнт перетворення датчика швидкості.

Підставляючи у формулу (3.8) значення коефіцієнтів можна визначити остаточний вигляд передавальної функції регулятора:

$$W_c(p) = 0,17 + 50 \frac{1}{p} \quad (3.9)$$

Передавальну функцію оптимізованого контура швидкості можна представити рівнянням:

$$W_c^{mo}(p) = \frac{1}{2T_{\mu c} + 1} \quad (3.10)$$

Тоді передавальна функція контура регулювання тиску набуває вигляду:

$$\begin{aligned} W_c(p) &= \frac{1}{2T_{\mu c} + 1} \cdot \frac{K_n}{T_n p + 1} \cdot \frac{K_c}{T_c p + 1} \cdot \frac{K_{дд}}{T_{дд} p + 1} \approx \\ &\approx \frac{K_n \cdot K_c \cdot K_{дд}}{K_{дс} (T_n p + 1)(T_c p + 1)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Передавальна функція регулятора тиску при настроюванні на модульний оптимум буде представлена так:

$$\begin{aligned} W_{рд}(p) &= \frac{K_{дс} (T_n p + 1)(T_c p + 1)}{2T_{\mu д} \cdot K_n \cdot K_c \cdot K_{дд} p} = \frac{K_{дс} T_n T_c}{2T_{\mu д} \cdot K_n \cdot K_c \cdot K_{дд} p} + \frac{K_{дс} (T_n + T_c)}{2T_{\mu д} \cdot K_n \cdot K_c \cdot K_{дд}} + \\ &+ \frac{K_{дс}}{2T_{\mu д} \cdot K_n \cdot K_c \cdot K_{дд}} \cdot \frac{1}{p} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Якщо не враховувати сталу часу насосу, можна отримати передавальну функцію ПІ регулятора у вигляді:

$$W_{р\text{д}}(p) = \frac{K_{\text{дс}}(T_c p + 1)}{2T_{\mu\text{д}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{дд}} p} = \frac{K_{\text{дс}} T_c}{2T_{\mu\text{д}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{дд}}} + \frac{K_{\text{дс}}}{2T_{\mu\text{д}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{дд}}} \cdot \frac{1}{p} \quad (3.13)$$

Коефіцієнти складових регулятора відповідно, становлять:

$$W_{р\text{д}}(p) = 109,7p + 149,31 + 30,47 \cdot \frac{1}{p}$$

$$W_{р\text{д}}(p) = 121,89 + 30,47 \cdot \frac{1}{p}$$

Імітаційна модель одноконтурної системи автоматичного керування процесом стабілізації тиску представлена на рис.3.11.

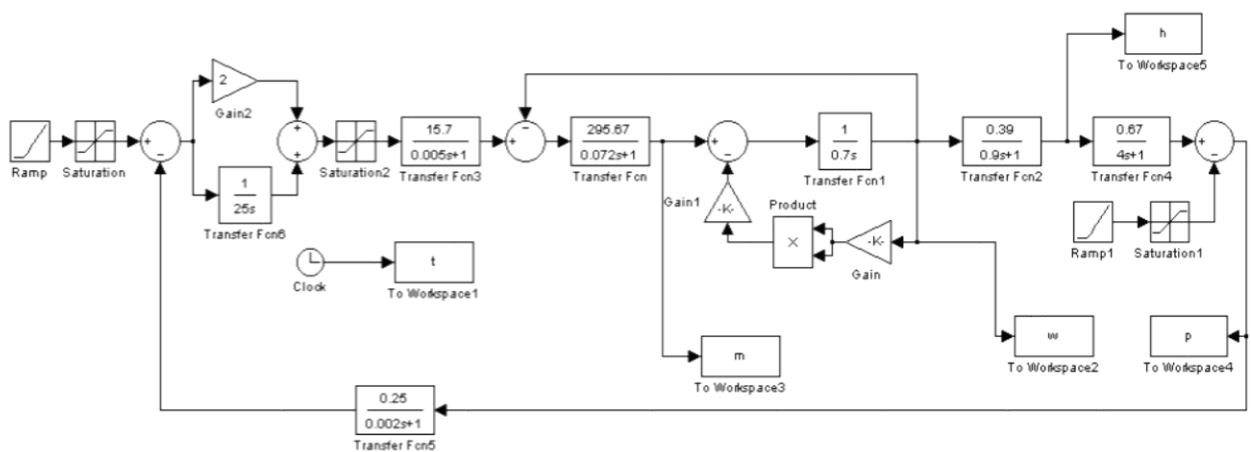


Рисунок 3.11 – Імітаційна модель одноконтурної системи автоматичного керування процесом стабілізації тиску

Аналізуючи результати моделювання можна зробити висновок, що за умови використання датчика інтенсивності немає необхідності ускладнювати систему управління шляхом введення додаткових контурів регулювання.

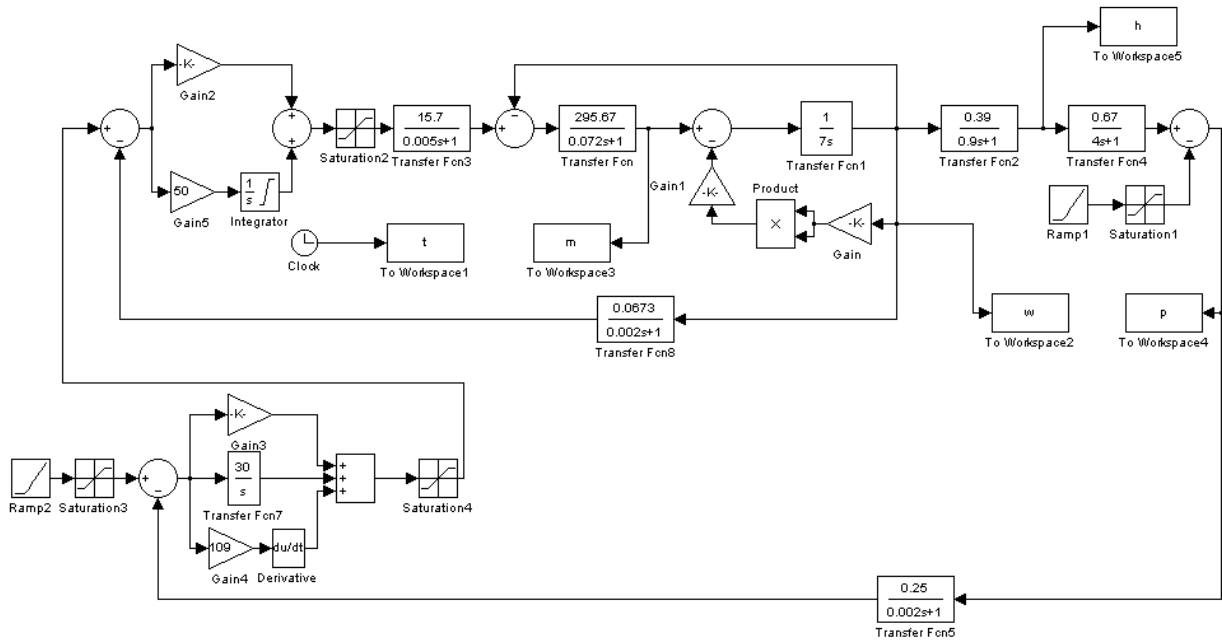


Рисунок 3.12 - Двоконтурна система стабілізації тиску

Для роботи насоса перекачки теплоносія для багатоповерхового будинку складена математична модель за системою рівнянь Нав'є-Стокса [19], написане в циліндричній системі координат у вигляді змінних $(\psi-\Omega)$

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \Omega}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \Omega}{\partial z} - \frac{v_r \Omega}{r} = \nu \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} - \frac{\Omega}{r^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -r\Omega \end{cases} \quad (3.14)$$

Граничні умови для моделювання:

$$\begin{cases} \psi = u_0 r, \Omega = 0 \\ \psi = \psi_0, \Omega = 0 \\ \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Витрати теплоносія насосу становлять:

$$Q = \int \rho v ds \quad (3.16)$$

Кутова швидкість енергоефективного електропривода гідронасоса

$$\omega = \left\{ \omega_0^2 + \frac{n\rho h}{J} \left[\frac{1}{2} v^2 (r_e^2 - r_i^2) - \frac{2}{3} v \sin \theta \omega_0 (r_e^3 - r_i^3) + \frac{1}{4} \omega_0^2 (r_e^4 - r_i^4) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

Чисельна реалізація рівнянь Нав'є-Стокса в змінних $(\psi-\Omega)$ розглядається рішенням рівнянь із граничними умовами.

Апроксимація рівнянь Нав'є-Стокса в змінних $(\psi-\Omega)$:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \Omega}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \Omega}{\partial z} - \frac{v_r \Omega}{r} = v \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} - \frac{\Omega}{r^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -r\Omega \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \Gamma_{ax} : \psi = u_0 r, \Omega = 0 \\ \Gamma_{cm} : \psi = \psi_0, \Omega = 0 \end{cases}$$

Графіки аналізу результатів чисельного моделювання системи рівнянь наведені на рис.3.13 – 3.16, відповідно до результатів розрахунку системи рівнянь при значення частоти 5-50Гц.

За результатом чисельного розрахунку, розраховані витрати теплоносія, швидкість двигуна та споживана електродвигуном потужність.

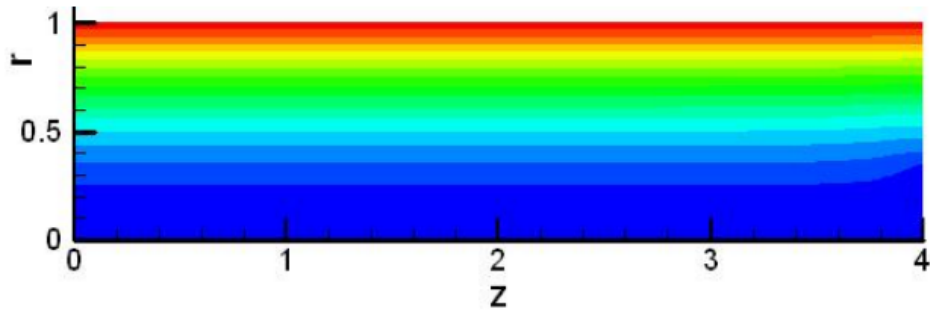


Рисунок 3.13 – Результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при частоті 5Гц

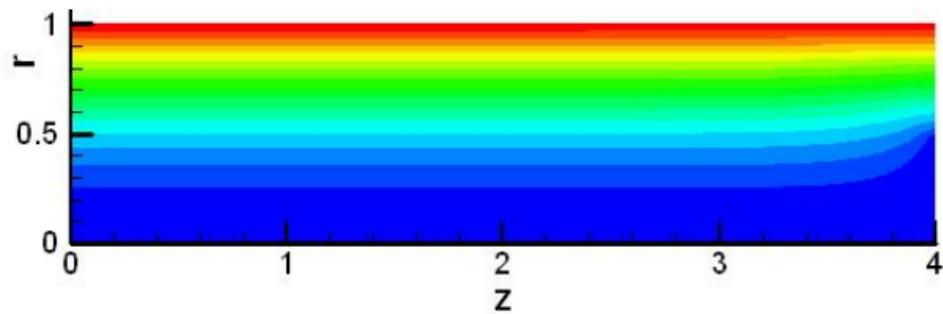


Рисунок 3.14 – Результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при частоті 15Гц

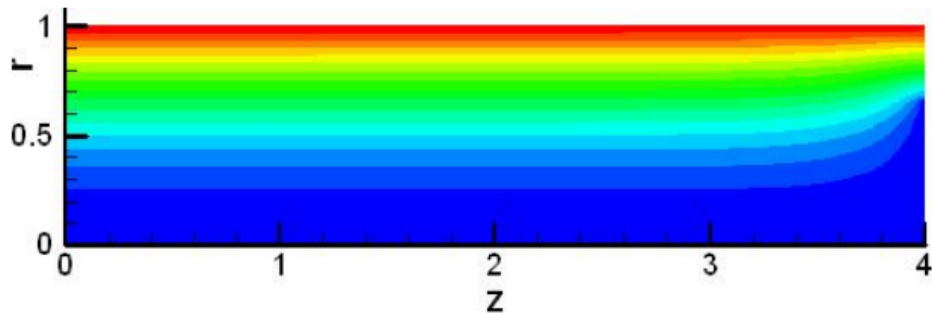


Рисунок 3.15 – Результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при частоті 25Гц

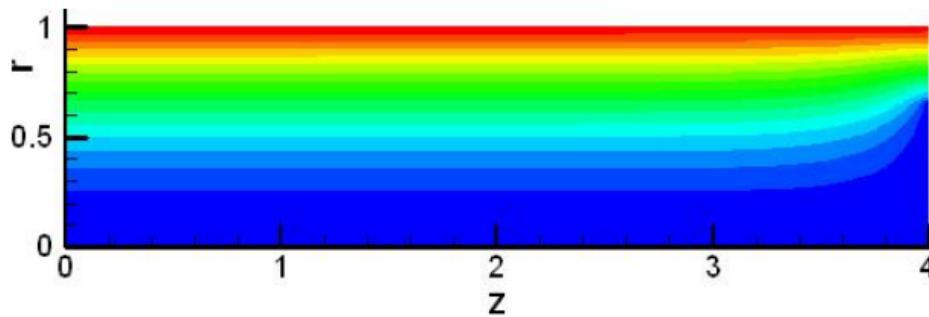


Рисунок 3.16 – Результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при частоті 50Гц

На рис. 3.17 представлений адаптивний алгоритм роботи перетворювача частоти, що підлаштовується під мінімальне енергоспоживання двигуна з максимальним ККД.

Робота адаптивного алгоритму зводиться до автоматичного пошуку оптимального значення струму, який відповідає мініимальному енергоспоживанню електропривода насосу.

У процесі включення алгоритму в роботу, в (блок 2) вносяться сталі параметри: початкове, кінцеве значення, крок зміни коефіцієнтів і кількість імпульсів, величина затримки, що враховує інерційність системи (А).

Коефіцієнт заповнення імпульсів (q) відповідає за амплітуду напруги, а кількість імпульсів (z) відповідає за частоту струму мережі. У блоці 3 проводиться опитування кнопки «Пуск». Якщо вона натиснута, то алгоритм переходить до підпрограми плавного пуску за лінійним законом керування (блок 4), у іншому випадку алгоритм повертається на перевірку кнопки SB1.

У блоці 5 відбувається опитування датчика мініимального тиску SP1 дискретно (тиск менше заданого). У блоці 6 відбувається запуск лічильника S1 з початковим значенням 0. У блоці 7 перевіряється, чи замкнений датчик (SP1). Якщо не замкнений, то в блоці 8 проводиться збільшення q та зменшення z на крок.

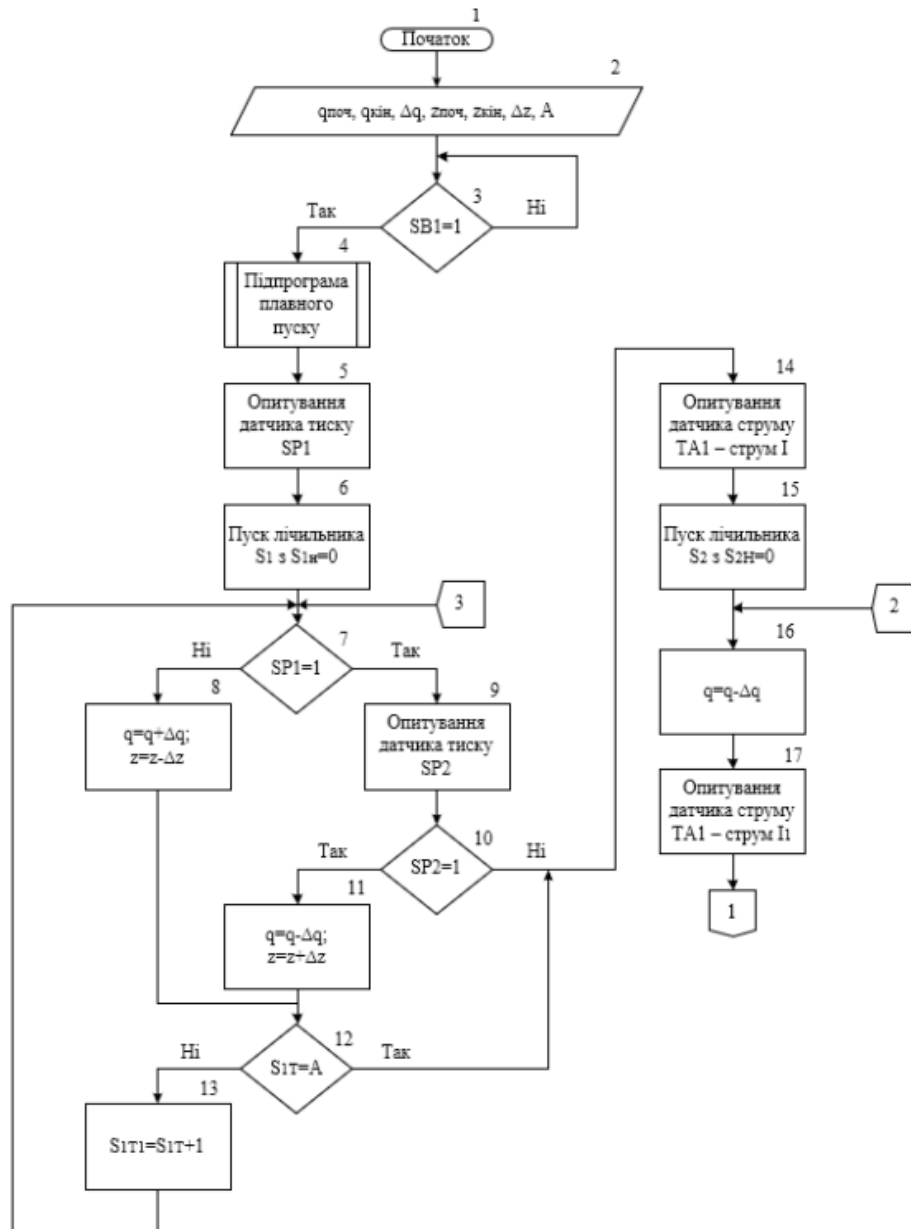


Рисунок 3.17 – Структурна схема адаптивного алгоритму управління перетворювачем частоти (початок)

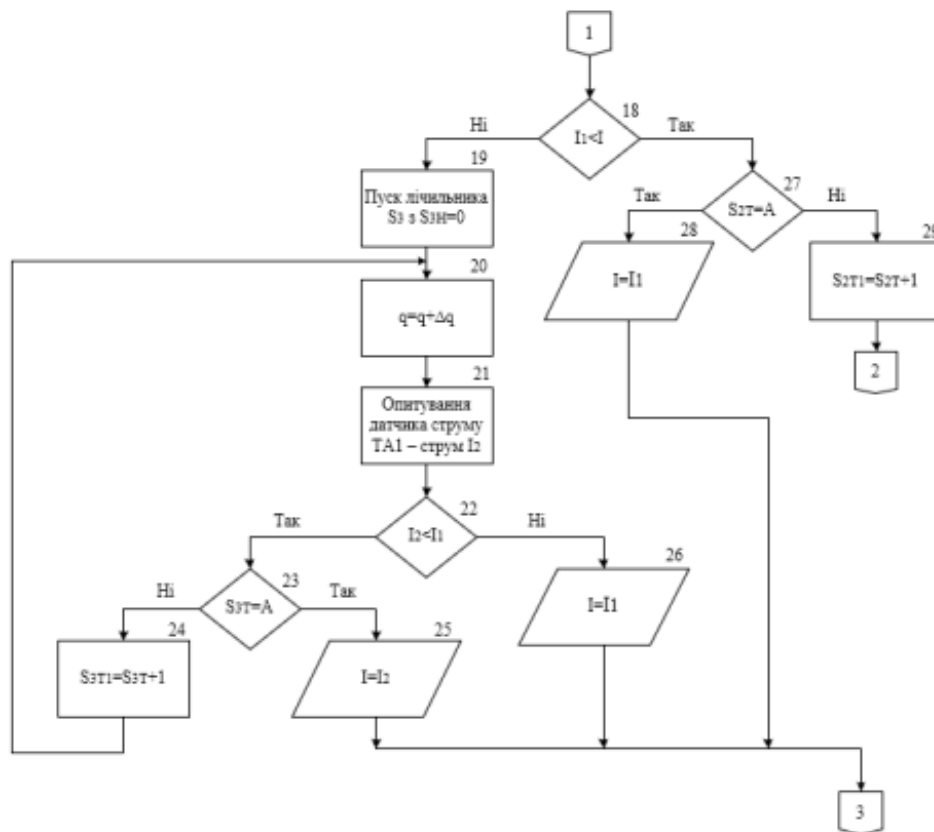


Рисунок 3.18 – Структурна схема адаптивного алгоритму управління перетворювачем частоти (закінчення)

Далі алгоритм переходить до блоку 12, в якому відбувається перевірка значення A лічильника інерційності. Якщо поточне значення $S1T$ не дорівнює A , то в блоці 13 збільшується $S1T$ на 1 і повернення до блоку 7. Якщо $SP1$ замкнутий, то відбувається опитування датчика максимального тиску $SP2$. Якщо $SP2$ замкнений, то в блоці 11 здійснюється зменшення q і збільшення z на крок.

Далі алгоритм переходить до блоку 12, в якому відбувається перевірка значення лічильника з A . Якщо поточне значення $S1T$ не дорівнює A , то в блоці 13 здійснюється збільшення $S1T$ на 1 і повернення до блоку 7. Якщо $SP2$ не замкнений, то алгоритм переходить до блоку 14 – з опитуванням датчика струму $TA1$, в результаті чого виходить значення струму I . У блоці 15 відбувається запуск лічильника $S2$ з початковим значенням $S2H = 0$. У блоці 16 відбувається зменшення q на крок. У блоці 17 відбувається опитування датчика

струму $TA1$, в результаті чого виходить значення струму $I1$. У блоці 18 здійснюється порівняння поточного струму $I1$ з попереднім значенням струму I . Якщо струм $I1 < I$, то в блоці 27 відбувається порівняння поточного значення лічильника $S2T$ з A . Якщо значення лічильника $S2T$ не дорівнює A , то в блоці 29 відбувається збільшення $S2T$ на 1 і повернення до блоку 16, а якщо значення лічильника $S2T$ рівне A , то параметри q і z залишаються без зміни. І далі двигун працює з цими параметрами при мінімальному струмі $I1$. Якщо струм $I1 > I$, то в блоці 19 відбувається запуск лічильника $S3$ з початковим значенням $S3H = 0$. У блоці 20 відбувається збільшення q на крок. У блоці 21 відбувається опитування датчика струму $TA1$, в результаті чого отримуємо струм $I2$. Якщо струм $I2 < I1$, то в блоці 23 порівнюється поточне значення лічильника $S3T$ з A . Якщо значення $S3T$ не дорівнює A , то в блоці 24 відбувається збільшення $S3T$ на 1 і повернення до блоку 20, а якщо значення лічильника $S3T$ рівне A , то параметри q і z залишаються без зміни. І далі двигун працює з цими параметрами при мінімальному струмі $I1$.

У процесі подальшої зміни тиску в системі теплопостачання відбувається опитування датчика тиску і струму і пошук значення оптимальних параметрів.

3.7 Висновки за розділом

1. Проведено імітаційне моделювання електропривода насосної установки для теплопостачання багатоповерхового будинку з використанням програмної оболонки Matlab / Simulink.

2. Отримано результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при різних частотах.

3. Розроблена імітаційна модель одноконтурної системи автоматичного керування процесом стабілізації тиску, на основі якої побудована двоконтурна система автоматичного керування процесом стабілізації тиску.

4. Аналіз результатів моделювання показав, що за умови використання задатчика інтенсивності немає необхідності ускладнювати систему керування шляхом введення додаткових контурів регулювання.

5. Розроблено адаптивний алгоритм роботи перетворювача частоти, що підлаштовується під мінімальне енергоспоживання двигуна з максимальним ККД.

ВИСНОВКИ

1. У даній кваліфікаційній роботі бакалавра проведено огляд систем електроприводу, що застосовуються в насосних установках. Встановлено, що висока точність відпрацювання заданих параметрів спричиняє безперервну зміну частоти обертання електродвигуна насосного агрегату і внаслідок цього сприяє виникненню знакозмінних навантажень на окремі елементи насосного агрегату (еластичні муфти, що з'єднують насос з двигуном і ін.). Тому в ряді випадків доводиться встановлювати підвищену зону нечутливості системи регулювання.

2. Вибір раціональної системи ЕП насососу здійснено на основі аналізу порівняльних технічних даних, а саме: діапазону регулювання, способу керування, діапазону потужностей електроприводів, енергетичних і динамічних показників, а також додаткових даних, котрі визначають умови експлуатації електроприводу насосної установки для транспортування теплоносія багатоповерхового будинку.

3. Остаточний вибір системи електроприводу здійснено на користь асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням.

4. Розроблено функціональну схему автоматизованого електроприводу насосної установки для транспортування теплоносія багатоповерхового будинку.

5. Проведено аналіз впливу зміни навантаження на втрати в електроприводі насосної установки. Встановлено, що постійні втрати асинхронного електроприводу не залежать від його навантаження і залишаються практично незмінними при незмінній швидкості. Разом з тим змінні втрати, до яких віднесені втрати в меді статора і ротора, залежать від навантаження.

6. Аналітично визначено, що середньодобове завантаження насосів гарячого водопостачання становить 50 ... 55% від максимального значення. Тому існуючі системи теплопостачання з нерегульованим електроприводом не

забезпечують ефективного зниження споживаної потужності в процесі зменшення витрат води, а також створюють при цьому надлишковий тиск води в гідросистемі, що спричиняє витoki води і несприятливо впливає на роботу технологічного обладнання й мереж водо і теплопостачання.

7. Найбільш доцільним, з точки зору економії електроенергії та точності відпрацювання технологічних параметрів, є асинхронний електропривод із скалярним керуванням.

8. Проведено імітаційне моделювання електропривода насосної установки для теплопостачання багатоповерхового будинку з використанням програмної оболонки Matlab / Simulink.

9. Отримано результати моделювання витрат теплоносія, швидкості двигуна та споживаної потужності при різних частотах.

10. Розроблена імітаційна модель одноконтурної системи автоматичного керування процесом стабілізації тиску, на основі якої побудована двоконтурна система автоматичного керування процесом стабілізації тиску.

11. Аналіз результатів моделювання показав, що за умови використання задатчика інтенсивності немає необхідності ускладнювати систему керування шляхом введення додаткових контурів регулювання.

12. Розроблено адаптивний алгоритм роботи перетворювача частоти, що підлаштовується під мінімальне енергоспоживання двигуна з максимальним ККД.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. – К.: Кондор, 2005. – 408с.
2. Emadi A. Energy-Efficient Electric Motors, Revised and Expanded. CRC Press, 2004. – 424 с.
3. Hayes J. G., Goodarzi G. A. Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles. Wiley, 2018. – 560 с.
4. Романюк, О. М. Гідравлічні і аеродинамічні машини / О. М. Романюк, Г. П. Вербицький, М. І. Колотило, В. Д. Колотило, Ф. М. Клепіков. – Кіровоград. – 1997. – 176 с.
5. Загірняк М. В., Клепіков В. Б., Ковбаса С. М. та ін. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Київ: НАН України, 2018. – 310 с.
6. Електронний ресурс. Режим доступу: https://tusk.ua/ua/chastotnyipreobrazovatel/?utm_source=cpc_tusk&utm_medium=cpc&utm_campaign=21374631562&gad_source=1&gad_campaignid=21374631562&gclid=EAiaIQobChMI-IT3s_yzjQMVIQuiAx2fnA-cEAAAYAiAAEgK33vD_BwE
7. Грицаєнко Г. І., Грицаєнко І. М. Інвестиційне забезпечення енергоефективності національної економіки Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (20–21 травня 2021 р.). – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2021. – С. 100–104.
8. Marchesoni M. (Ed.) Energy Efficiency in Electric Motors, Drives, Power Converters and Related Systems. MDPI, 2020. – 248 с.
9. Монтаж, експлуатація та ремонт гідромашин і гідропневмоприводів: навч. посіб. / В. О. Панченко, О. Г. Гусак, А. А. Папченко, С. О. Хованський. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 151 с.

10. Кушка О. В., Степова Н. В. Щодо оптимізації розрахунку внутрішніх систем холодного та гарячого водопроводу Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2021, № 36. – С. 18 – 26.

11. Семенюк М., Куцик А., Тутка В. Математична модель частотно-регульованого асинхронного електроприводу методом середніх напруг на кроці чисельного інтегрування. «Науковий вісник НУ «Львівська політехніка», 2023. – Вип. 13, № 1. – С. 23–30.

12. Шуруб Ю. В. Статистична оптимізація частотно-регульованих асинхронних електроприводів при скалярному керуванні. «Електротехніка і електромеханіка», 2017. – № 1. – С. 26–30.

13. Безсмертний В. В. Розробка енергозберігаючого електроприводу для систем водопостачання. Хмельницький національний університет, 2023. – 200 с.

14. Carraro E., Bianchi N., Zhang S., Koch M. Design and Performance Comparison of Fractional Slot Concentrated Winding Spoke Type Synchronous Motors With Different Slot-Pole Combinations IEEE Transactions on Industry Applications, 2018.

15. Василега П. О., Муріков Д. В. Електропривод робочих машин Навчальний посібник / Василега П. О., Муріков Д. В. – Суми: Університетська книга, 2006. – 228 с.

16. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник / В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І.Мілих. – Київ : Каравела, 2012. – 688 с.

17. Панченко В. О. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій: навчальний посібник / В. О. Панченко, В. Ф. Герман, О. В. Івченко та ін.; за загальною редакцією В. О. Панченка. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 270 с.

18. Жигилій С.М. Застосування теореми про зміну кінетичної енергії для дослідження динаміки руху кульки рухомого дебалансу Полтава:

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 138 – 140.

19. Синєглазов В. М., Зіганшин А. А. Метод скінченних об'ємів для розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для вертикально-осьових гідротурбін Електроніка та системи управління, 2016. – № 1(47). – С. 116–120.

20. Толочко О. І. Моделювання систем автоматичного керування Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 328 с.

21. Крих Г. Моделювання системи керування з регулятором на підставі внутрішньої моделі Науковий вісник НЛТУ України, 2019. – Т. 29, № 9. – С. 161–165.

ДОДАТКИ

1. TECHNOLOGICAL PART

1.1 DESIGN OF A FUNCTIONAL SCHEME OF AN AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

1.1.1 Overview of electric drive systems used in pumping installations

In modern and foreign systems for regulating the operating modes of pumping equipment, the regulated parameter is the fluid pressure. Modern technology allows maintaining the set pressure with high accuracy.

High accuracy of working out the set parameters causes a continuous change in the speed of the electric motor of the pumping unit and, as a result, contributes to the occurrence of alternating loads on individual elements of the pumping unit (elastic couplings connecting the pump with the engine, etc.). Therefore, in some cases, it is necessary to establish an increased dead zone of the control system, which reduces the accuracy of resistance stabilization [4].

Stabilization of the liquid pressure is carried out due to the fact that when the water intake decreases, the pressure in the network increases, and the speed of the pump motor decreases as a result of the action of the regulation system. When the water supply increases, on the contrary, the liquid pressure in the network decreases, and the speed increases.

The main purpose of the liquid pressure stabilization system in the pipeline system is to maintain the pressure at a given level. In the pressure stabilization systems in the network, it is necessary to provide for the inclusion of additional unregulated pumps with significant increases in the inflow or water supply and their disconnection when they decrease.

The largest units with the most gentle characteristics should be equipped with a regulated drive. In the case of using pumps of the same type, to avoid the formation of dead zones of the impeller of unregulated pumps, they should have working pipeline diameters smaller than the regulated ones.

With equal diameters and operation of the adjustable pump in the maximum flow mode with an increased speed (in the case of using a frequent electric drive), it must be equipped with an engine of increased power in relation to the recommendations [5].

Despite the obvious advantages, the adjustable electric drive has not yet become widespread in pumping installations. The rapid development of semiconductor technology has made it possible to create reliable and relatively inexpensive adjustable electric drives based on static converters. In addition, the global energy crisis has clearly demonstrated the true value of energy resources and stimulated measures for their rational use. As a result, work has expanded on the research, development and creation of innovative pumping installations equipped with an automated adjustable electric drive.

In the pumping station, a conventional short-circuited asynchronous electric motor with a capacity of 110 kW is switched on via a frequency converter [6]. The electric drive control system is built similarly to the traditional one, except that the ultrasonic level sensor Exo3 is used as a level sensor in the system. The use of a frequency electric drive in this installation reduces electricity consumption by 60 thousand. kWh per year, that is, by approximately 5%.

Modern stations also use frequency converters of the PChR-2 type, on the basis of which more than 10 systems for automatic adjustment of the operating mode of pumping stations with units with a capacity of 75 to 160 kW have been created and are operating. The control system using a frequency converter of the SAMI type from the Stombegg company provides electricity savings of 7-8% of its total need.

Frequency converters are highly reliable and fairly compact systems for regulating surface units. To ensure uniform use of surface units, a device is provided by which they can be connected alternately to one converter.

There are known cases of the use of domestic frequency converters of the PSHT type in Kharkiv. At high-performance pumping stations, using an electric drive based on a valve electric motor, six pumps of the 30-FV-17 brand were used, installed at the station, one of them is equipped with such an electric drive using a PCHVN converter developed by the XEMZ Research Institute. The electric drive power is 1600 kW, the motor voltage is 10 kV. The converter is connected via a step-down dry transformer with a capacity of 4000 kVA, and the motor is connected to the converter via the same step-up transformer. The converter also includes a thyristor power converter for the excitation system of the synchronous electric motor. An air bell and a differential pressure gauge with an output of 0-5 mA were used as a level sensor. A PI regulator of the P-17 type was used in the control system. The use of a CAK with a regulated electric drive reduced electricity consumption by approximately 1200 kW/h per year, improved the operating conditions of pumping equipment, and facilitated the working conditions of operational personnel.

Analysis of the operation of a CAK with an electric drive of a pumping unit shows that equipping a second pumping unit with a similar electric drive would allow for almost double the electricity savings. A device was tested at the station that turns off the operation of a regulated pump in the low efficiency zone.

The possibility of controlling the speed of short-circuited asynchronous electric motors has been widely proven.

This possibility was realized only with the advent of power semiconductor devices - first thyristors, and later IGBT transistors. Currently, the method of controlling an asynchronous machine is widely implemented all over the world, which is considered today not only from the point of view of energy saving, but also from the point of view of improving the control of the technological process.

The control of alternating current electric motors is complicated by a number of circumstances, the most significant of which are:

- the moment of the electric motor is determined by the product of two resultant vectors of the electromagnetic parameters of the stator and rotor and is a function of four variables;

- there is a strong interaction of the magnetizing forces of the stator and rotor, the mutual state of which is constantly changing during the rotation of the rotor;
- in order to better use the engine in different modes of its operation, the task of regulating the magnetic flux of the engine arises.

The requirements for the electric drive are determined by the speed control range and the type of load. The relationship between speed and drag torque is not the same for different types of loads.

Some types of loads have a variable mechanical characteristic, for which the load torque increases with increasing speed. A typical example of installations with such a load are pumps, whose mechanical characteristic is described by the equation of a quadratic parabola, which means that the required power is proportional to the cube of the speed. It follows that even a small decrease in the speed of the electric drive can give a significant gain in power - this is why saving electricity is the main advantage of using a controlled electric drive for pumps. A theoretical decrease in speed by 10% gives a thirty percent saving in power.

The use of a regulated electric drive in a turbomechanism allows you to gain the following points:

- a high power factor ($\cos\phi$) helps to reduce electricity costs.
- due to the elimination of current peaks during start-up, there is no need for large-section electrical cables, while motors with direct connection to the power supply network absorb a current that is 6-7 times higher than the nominal value.

Thus, it is possible to avoid the risk of shock from large currents, as well as reduce installation costs.

- lack of need for maintenance: the inverter does not require maintenance, as it consists of static elements.
- electricity savings from 30 to 60%.

Therefore, the number of enterprises that consider the use of electric drives with adjustable speed as the key to energy saving, increasing the profitability and competitiveness of the enterprise, improving the environmental situation is increasing.

The experience of industrially developed countries shows that with an effective technological policy, the question of where to direct capital investments - to increase electricity production or to energy saving, in the vast majority of cases is resolved in favor of investments in energy saving [7].

According to the consulting group AGCAdvisoryGroup (USA), in 2024 the global market for adjustable electric drives was estimated at approximately 2.6 billion USD and will grow by 5.3% annually in the next few years.

It is assumed that in five years in industrially developed countries the ratio of unregulated and regulated electric drives will be 1:2. In Ukraine, the regulated electric drive still accounts for no more than 2-2.5% of the entire drive market.

The creation of power semiconductor devices with new properties and characteristics has made it possible to convert electrical energy into forms most convenient for its electromechanical conversion, which has opened up wide opportunities for the creation of technically advanced adjustable electric drives. And the use of advances in microprocessor and computer technology has fundamentally changed the element base, functionality and "intelligence" of the electric drive control system. For example, according to the US Electric Power Institute, within the framework of the Program for the reconstruction of 60 power units of TPPs in the period from 1986 to 1995, more than 300 frequency-controlled electric drives with a capacity of 630 to 4500 kW and a voltage of 2400, 4160 and 6600 V were introduced, which ensured annual electricity savings of about 1 billion kW/h. In addition to direct electricity savings, the use of powerful frequency-controlled electric drives made it possible to increase the power of power units.

To compare the efficiency of resource management using frequency converters, we will take the results of research conducted in Poland. Traditionally, valves are used to regulate pressure, which change the pump performance. When using a regulated electric drive with a frequency converter, the pump performance can change due to changes in the engine speed [4].

High indicators of electricity economy are also due to the fact that the tests revealed a significant overestimation of the nominal power of the motors used. When using frequency converters in this system, it can be used electric motors of significantly lower nominal power. Designing various control systems using a regulated asynchronous electric drive allows you to optimize their condition, reduce their cost and significantly save electricity during operation [2].

1.1.2 Selection of a rational EP system and development of a functional scheme of an automated electric pump drive

The selection of a control system is carried out on the basis of an analysis of comparative technical data, namely: the range of regulation, control method, resource - wear resistance conditions, the range of possible powers of electric drives, energy and dynamic indicators, as well as additional data that determine the operating conditions of the electric drive.

The economic assessment of the control system should be based on the principle of minimum costs associated with initial costs, operating costs for repairs, and electricity costs. The system with the best economic indicators is selected.

If the economic indicators are relatively close, then an additional assessment is performed according to macro-dimensional indicators and conditions. Currently, the most widespread are AC electric drive systems, since they are cheaper and more reliable than DC electric drives [8]. We choose scalar control of pumps, as it has the following advantages:

Economic effect from the use of frequency converters: saving electrical energy due to optimization of operation by 30% -60%, reducing excessive water consumption to 5% and reducing hidden water leaks by ensuring constant pressure in the network and removing excess pressure. Reducing pressure with stable supply. Reducing mechanical and, as a result, electrical power consumed from the network due to reducing the engine speed. Absence of hydraulic losses due to the absence of throttle elements. Reducing reactive power exchanged by the electric motor with the power supply network.

The designed automated electric pump drive has a pressure sensor, a pressure regulator, to the input of which the difference between the set signal and the feedback signal according to the measured pressure value is supplied.

We will also introduce feedback on the motor current into the circuit to compensate for the voltage drop across the active stator resistance. This feedback signal is subtracted from the set value of the stator EMF and fed to the voltage regulator unit. The head is maintained within the specified limits by changing the engine speed using a frequency regulator. The power switch control unit processes signals from the frequency and voltage regulators, on the basis of which control pulses are generated.

1.2 Conclusions by section

5. During the work on the first section of the bachelor's qualification work, a review of electric drive systems used in pumping units was conducted. It was established that high accuracy of working out the specified parameters causes a continuous change in the speed of rotation of the electric motor of the deposition unit and, as a result, contributes to the occurrence of alternating loads on individual elements of the pumping unit (elastic couplings connecting the pump with the engine, etc.). Therefore, in some cases, it is necessary to establish an increased dead zone of the control system.

6. The choice of a rational EP pump-suction system was made on the basis of an analysis of comparative technical data, namely: the control range, the control method, the power range of electric drives, energy and dynamic indicators, as well as additional data that determine the operating conditions of the electric drive of the pumping unit for transporting the coolant of a multi-storey building.

7. The final choice of the electric drive system was made in favor of an asynchronous electric drive with scalar control.

8. A functional diagram of an automated electric drive of the pumping unit for transporting the coolant of a multi-storey building was developed.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Енергозберігаючий електропривод насосу для
теплопостачання багатопверхового будинку**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

Д. Н. ДАВИДОВ

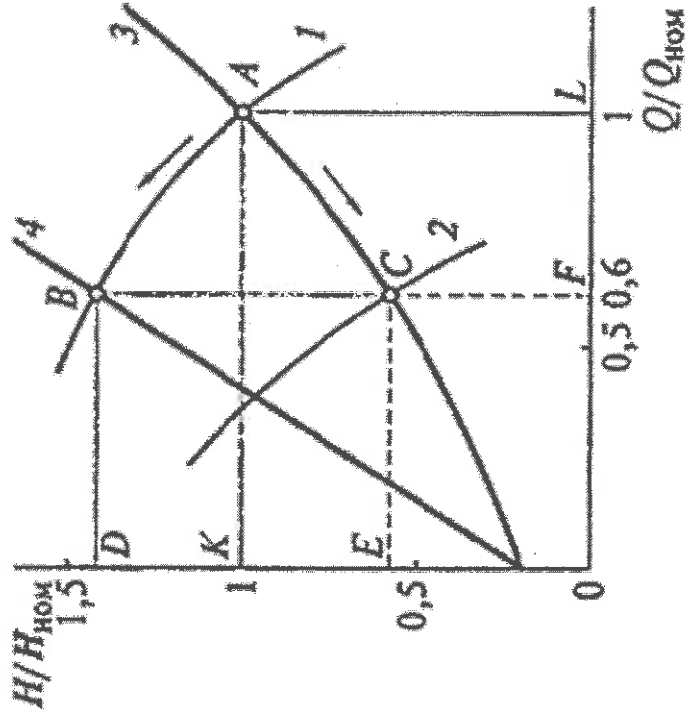
Керівник:

Д.Т.Н., професор

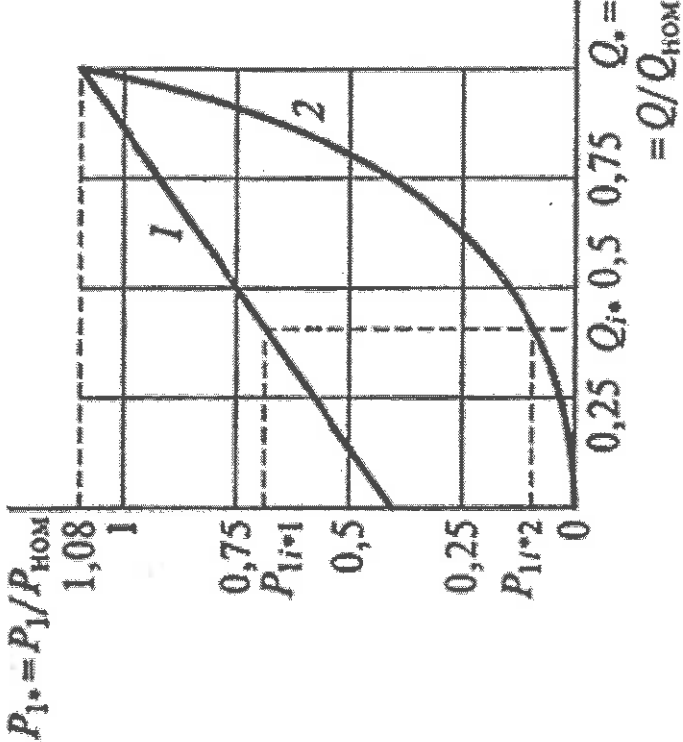
Л. І. ЛЕВІ

Полтава 2025

Мета роботи — розробити енергозберігаючий електропривод насосу системи тепlopостачання багатопверхового будинку з метою підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення надійної і стабільної роботи тепlopостачальної системи.



Характеристики продуктивності відцентрового насоса при дросельному та частотному регулюванні

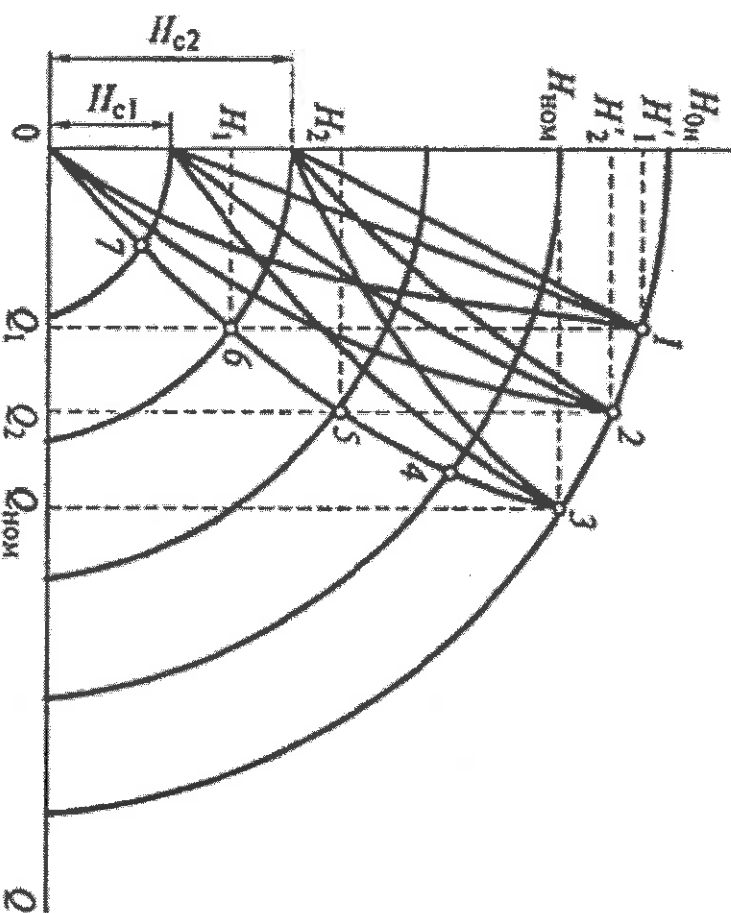


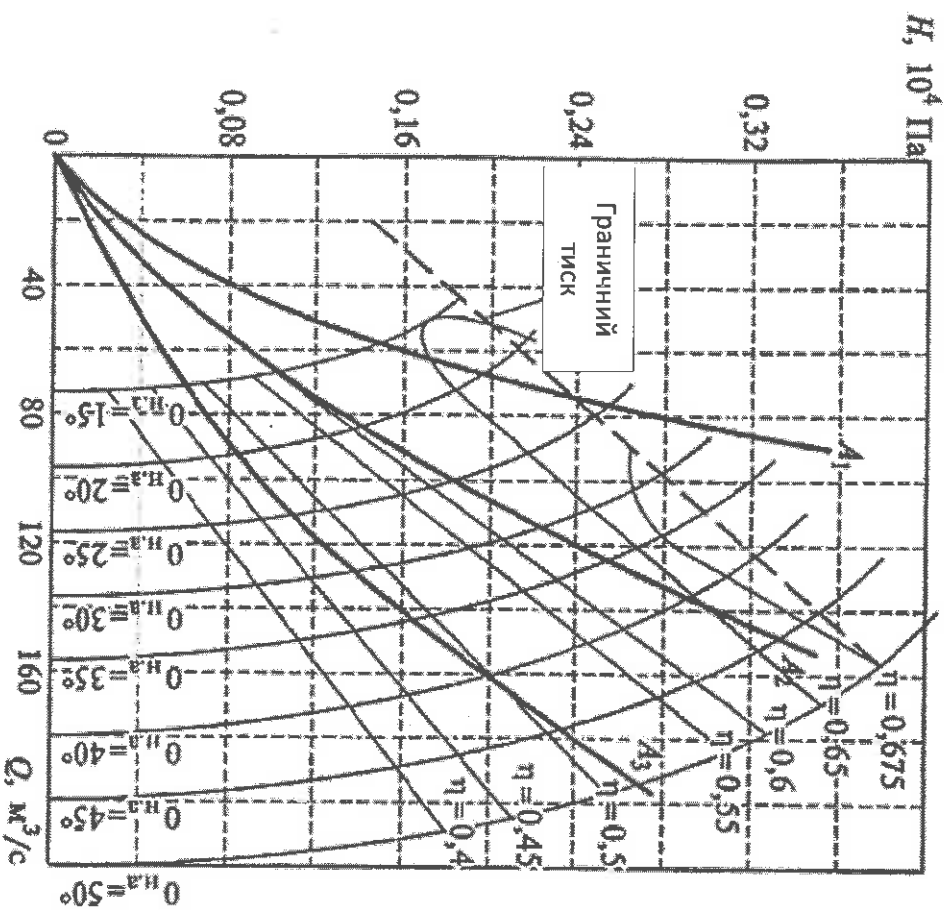
Залежності $P_1^* = f(Q^*)$ при дросельному (крива 1) і частотному (крива 2) регулюванні

Споживана електроприводом відцентрового насосу потужність при дросельному і частотному регулюванні в залежності від витрат рідини і статичного напору

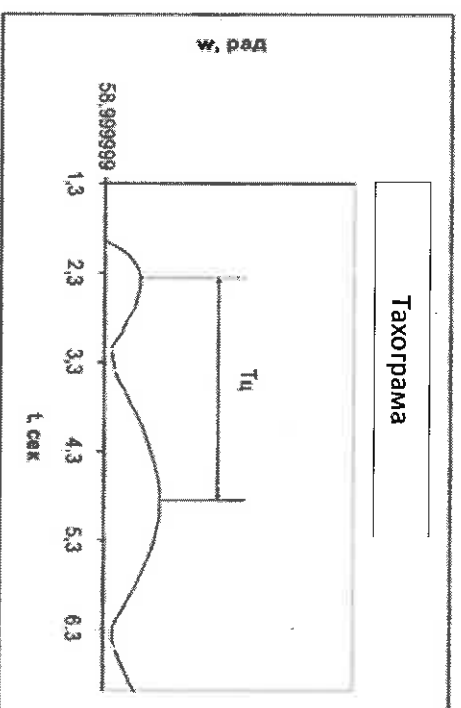
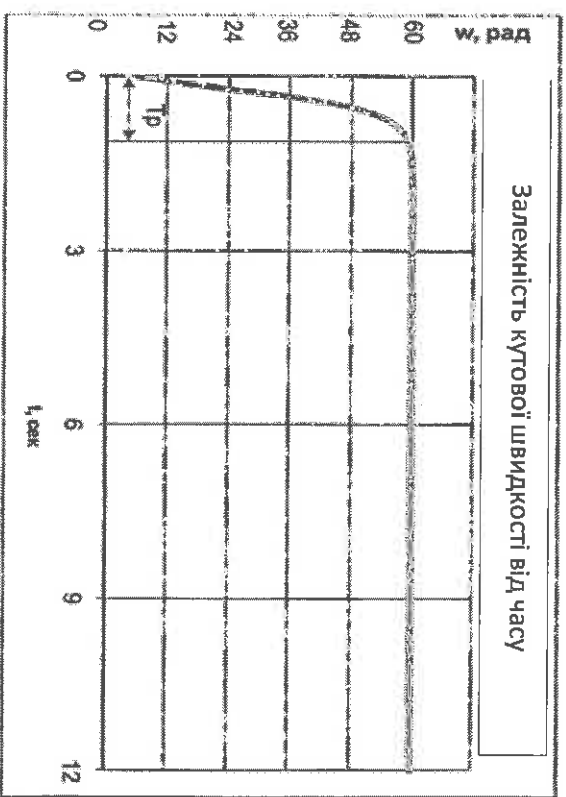
Витрати Q^*	$P_1, \text{МВт}$					
	Дросельне регулювання	Частотне регулювання				
		$h_c=0$	$h_c=0,2$	$h_c=0,4$	$h_c=0,6$	$h_c=0,8$
0	0,43	0	0,04	0,11	0,2	0,31
0,2	0,56	0,01	0,08	0,18	0,3	0,42
0,4	0,69	0,08	0,16	0,28	0,41	0,55
0,6	0,82	0,24	0,35	0,45	0,58	0,7
0,8	0,95	0,56	0,64	0,71	0,8	0,87
1	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08

Характеристики способів регулювання відцентрового насоса: 1, 2, 3 – робочі точки при дросельному регулюванні подачі; 4, 5, 6, 7 – робочі точки при регулюванні подачі за рахунок зміни частоти обертання двигуна

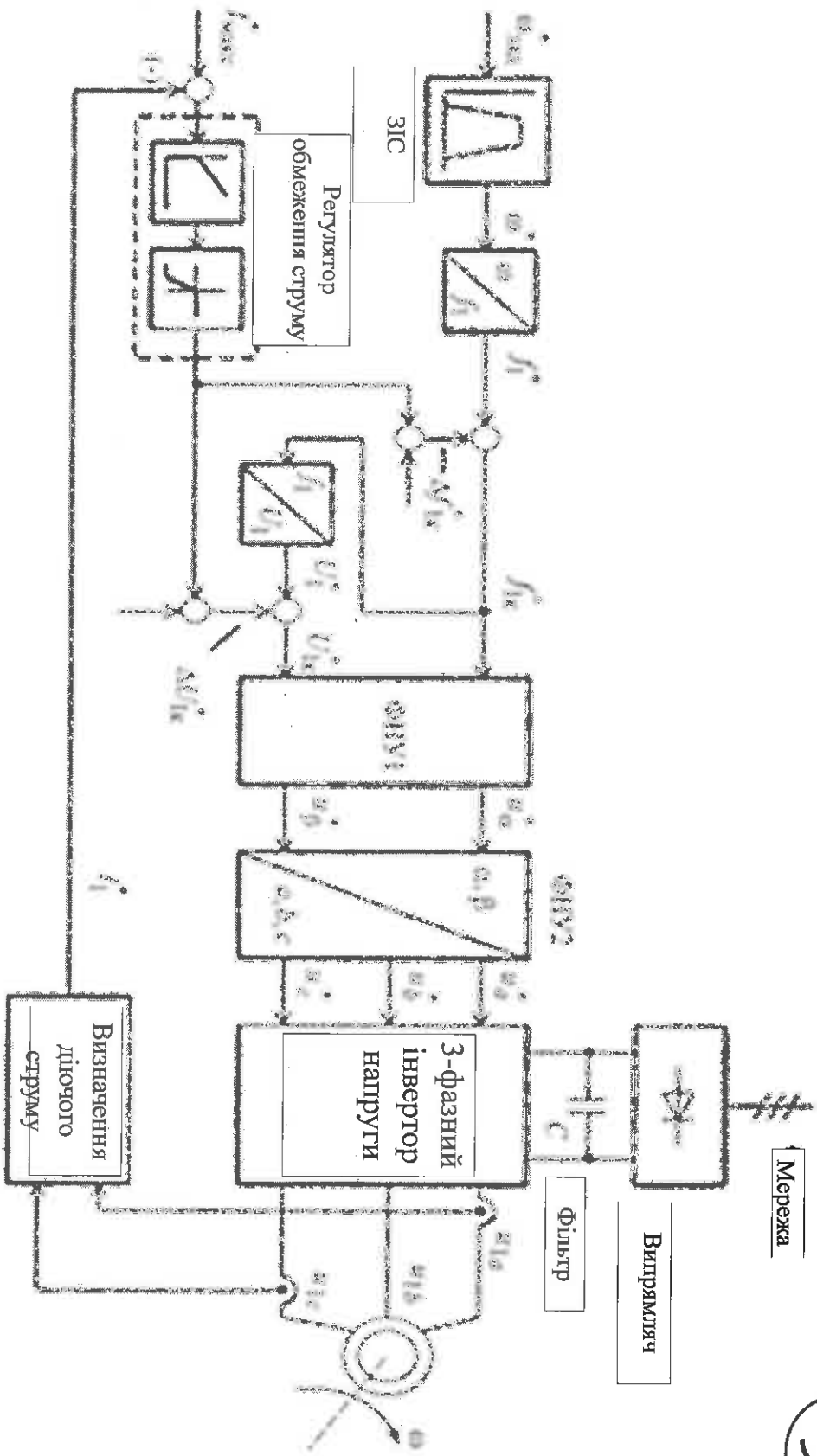




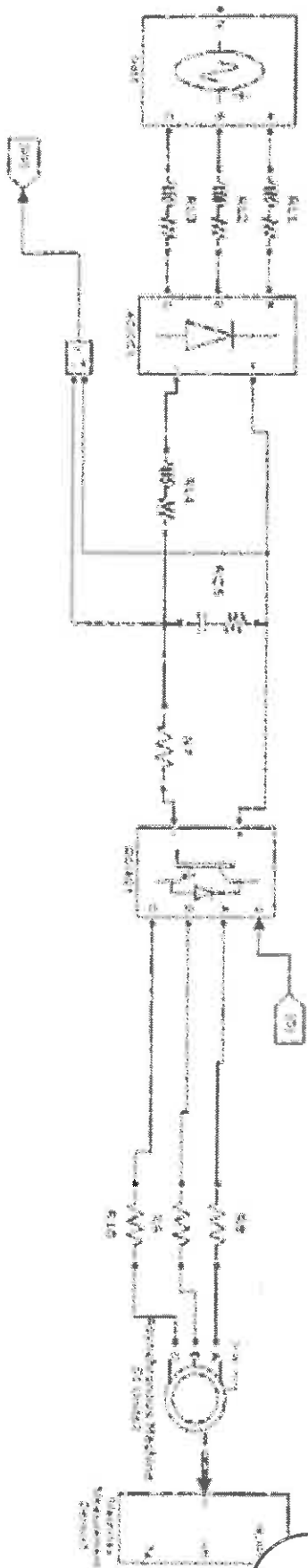
Експлуатаційні характеристики турбокомпресора серії В



Графік залежності кутової швидкості привода від часу: а - залежність кутової швидкості вала гідромотора від часу, б – тахограма процесу

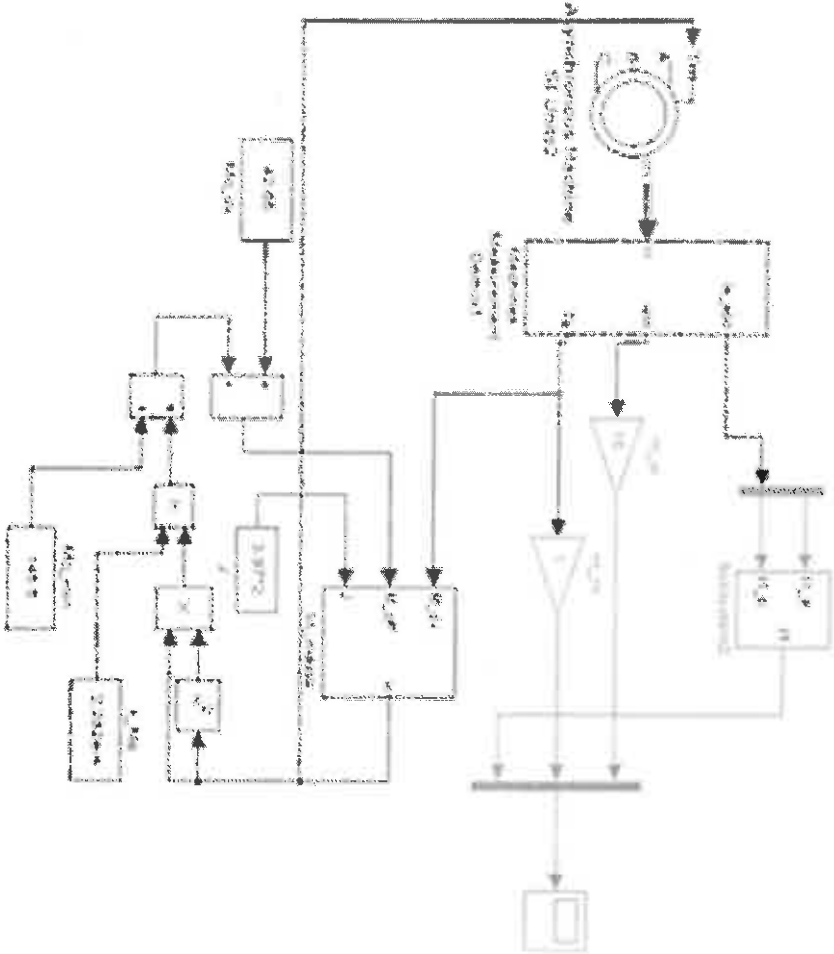


Функціональна схема асинхронного частотно-регульованого електроприводу зі скалярним керуванням

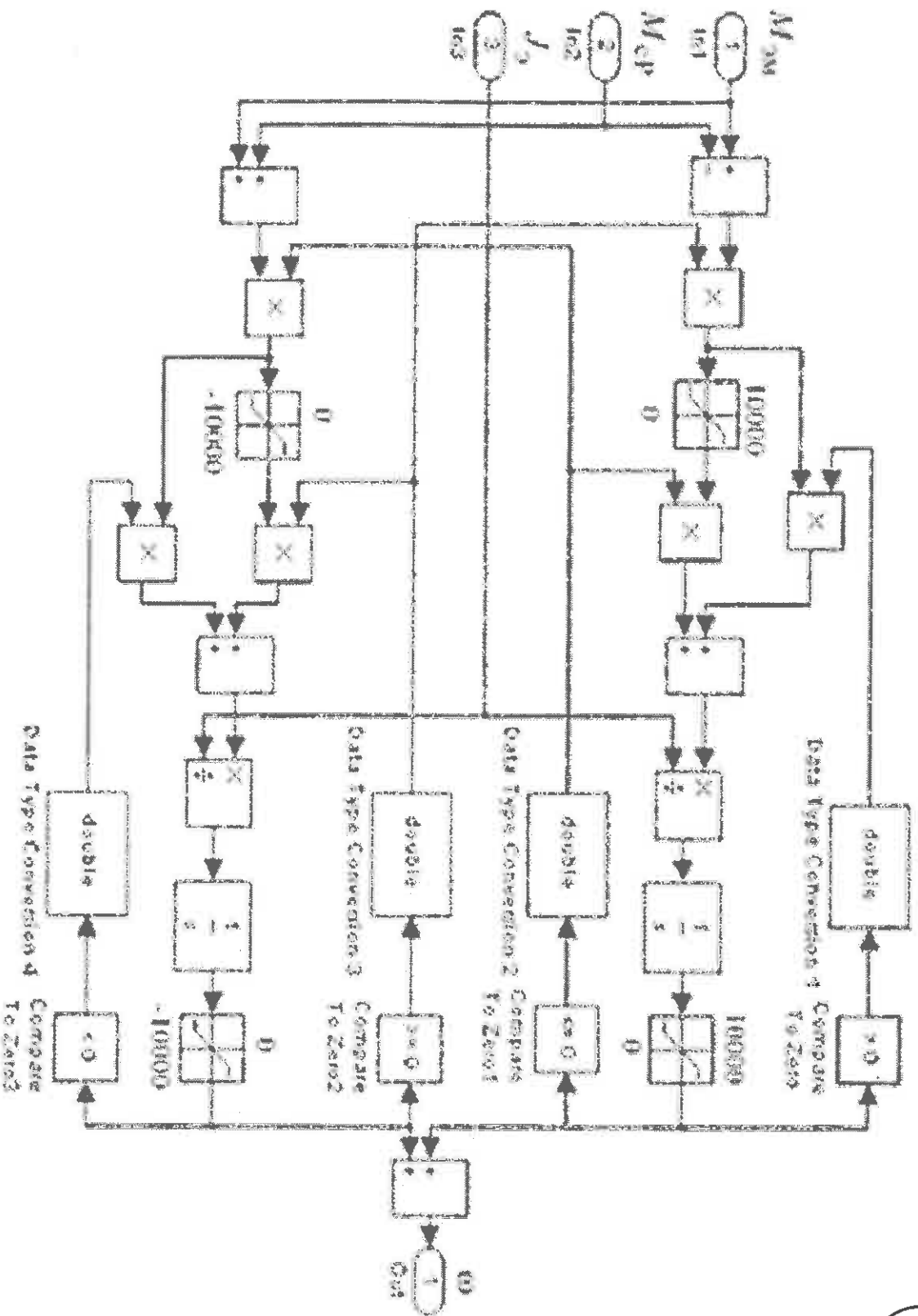


6

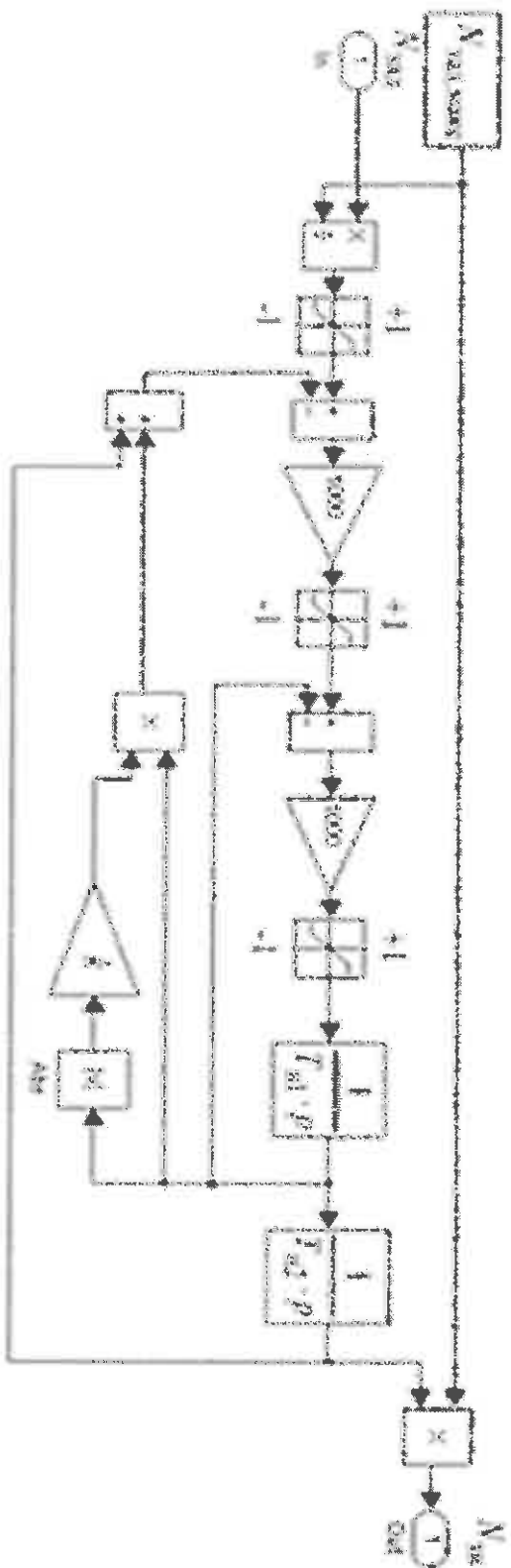
Імітаційна модель електричної частини силового каналу



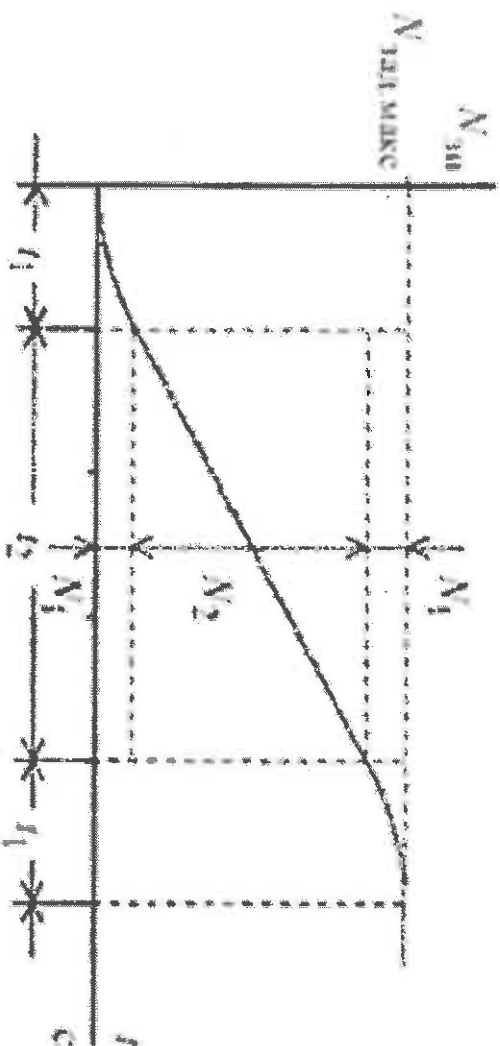
Імітаційна модель системи
 перетворювач частоти –
 асинхронний
 електродвигун із насосним
 навантаженням для
 багатоповерхового
 будинку



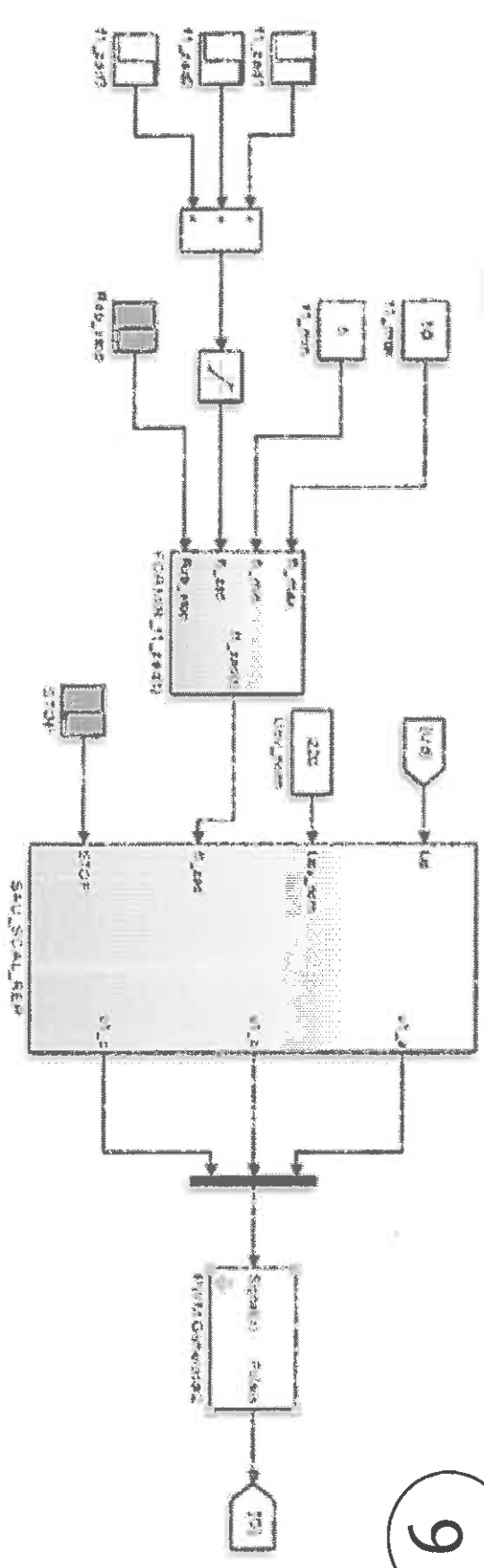
Імітаційна модель одномасової механічної системи з реактивним навантаженням



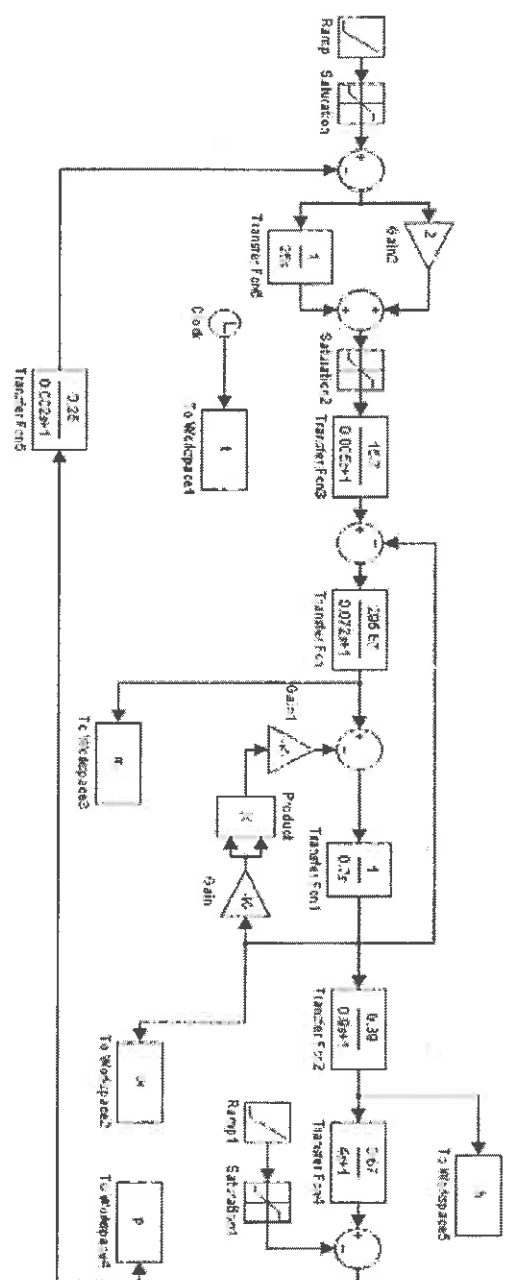
Імітаційна модель задатчика швидкості з S – подібною характеристикою



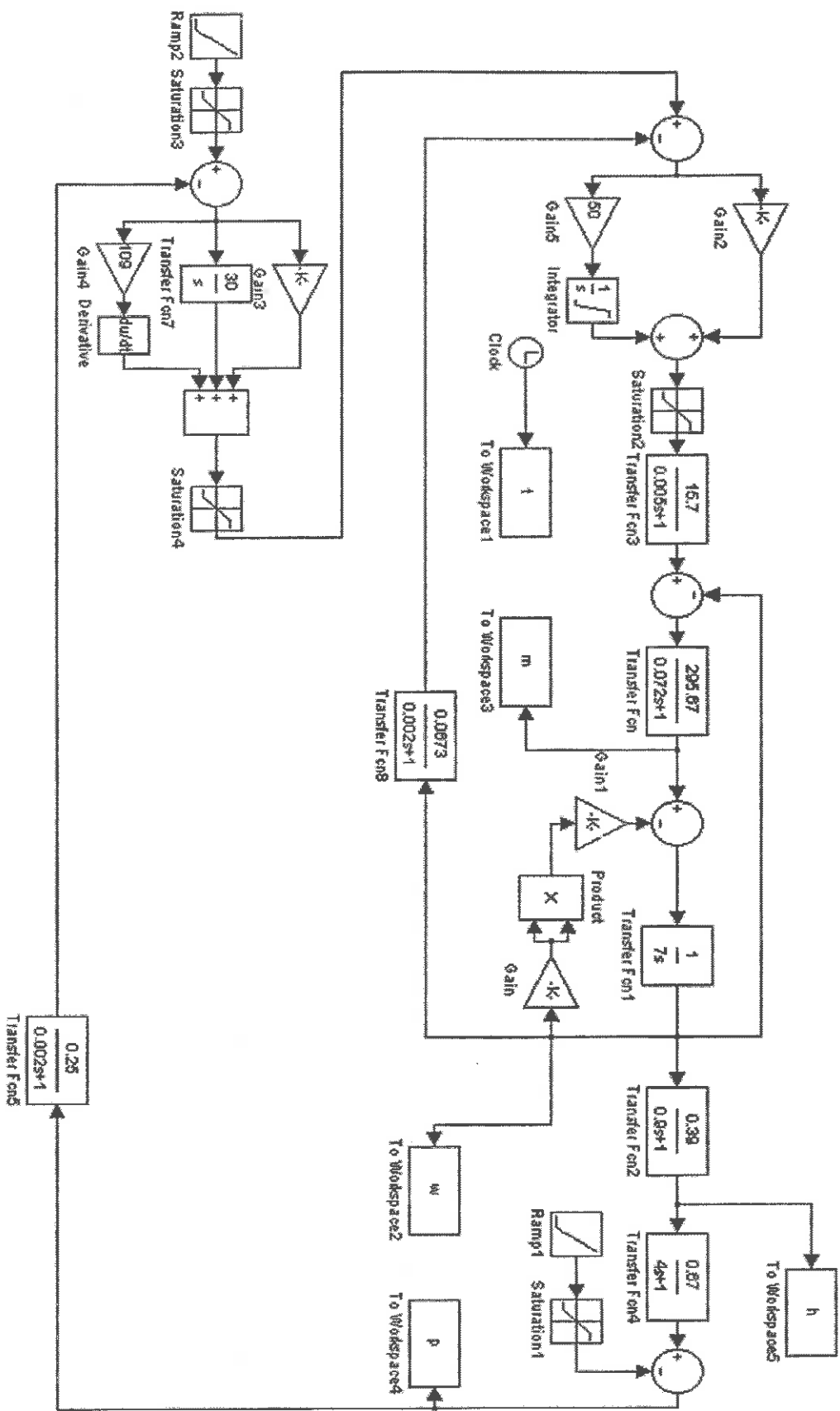
Часова діаграма
імітаційної моделі
задатчика швидкості з
S – подібною
характеристикою



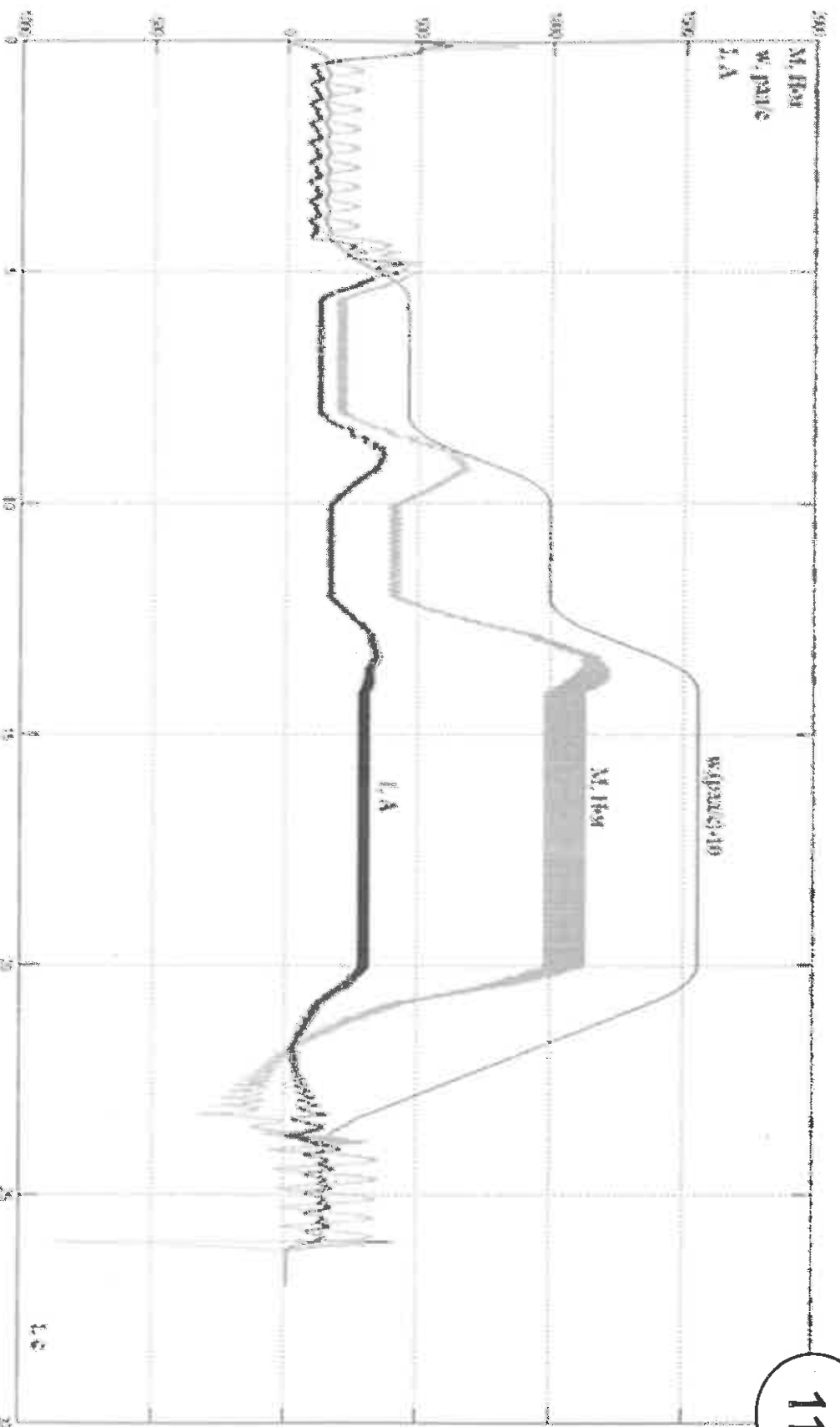
Імітаційна модель завдання на силовий канал системи перетворювач частоти – асинхронного електродвигуна



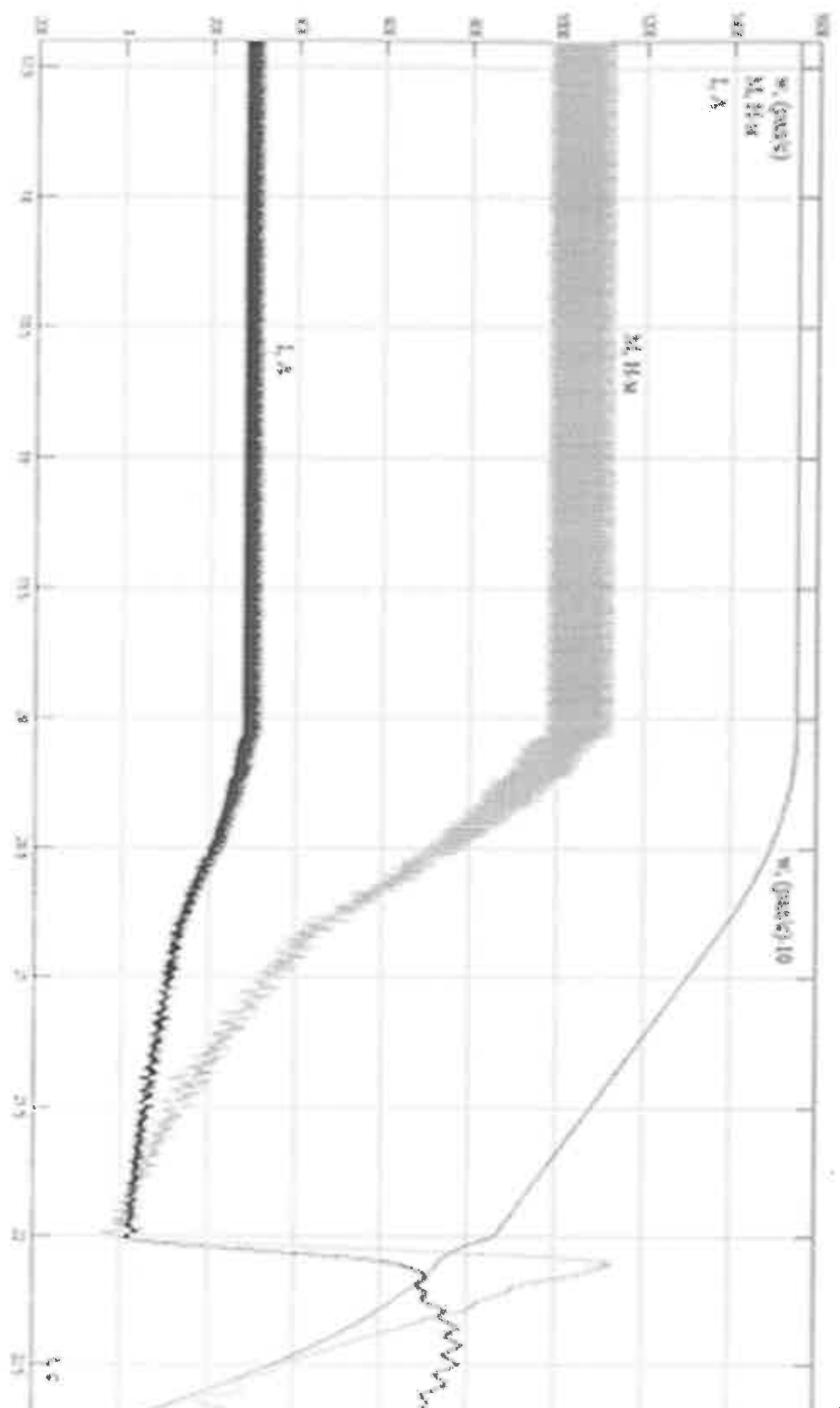
Імітаційна модель одноконтурної системи автоматичного керування процесом стабілізації тиску



Двоконтурна система стабілізації тиску



Діаграми відпрацювання електроприводом насоса
ступінчастого циклу: 5 Гц, 15 Гц, 25 Гц, 50 Гц; та повна зупинка у
разі потреби



Діаграми відпрацювання електроприводом насоса
програми пуску без компенсації вольт-частотних
характеристик

Результати моделювання витрат
теплоносія, швидкості двигуна та
споживаної потужності при частоті

5Гц



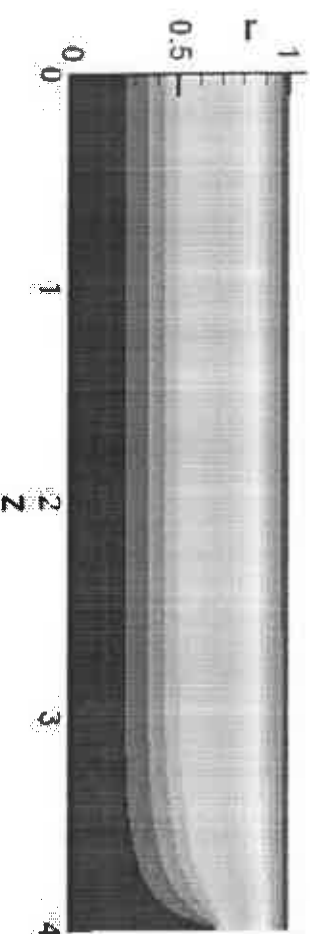
Результати моделювання витрат
теплоносія, швидкості двигуна та
споживаної потужності при частоті

15Гц



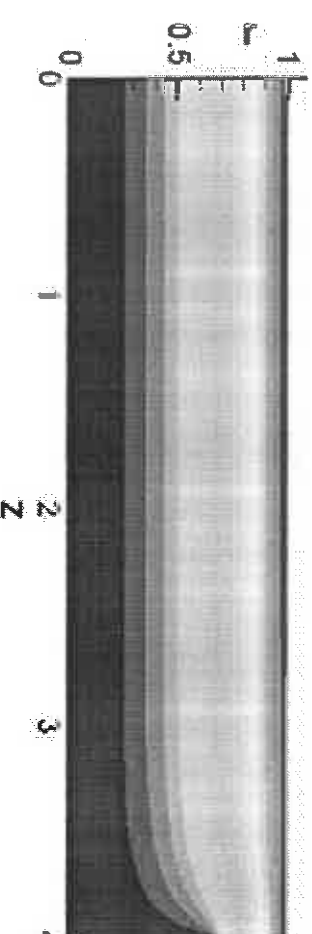
Результати моделювання витрат
теплоносія, швидкості двигуна та
споживаної потужності при частоті

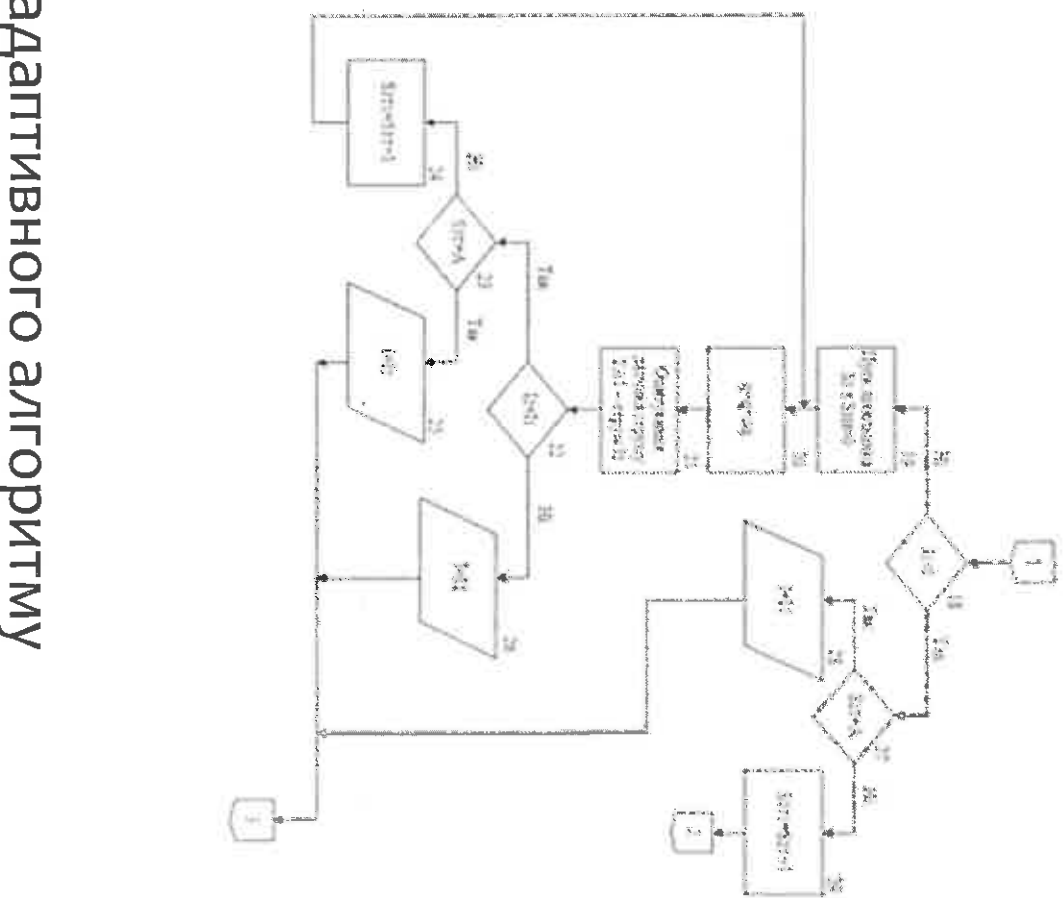
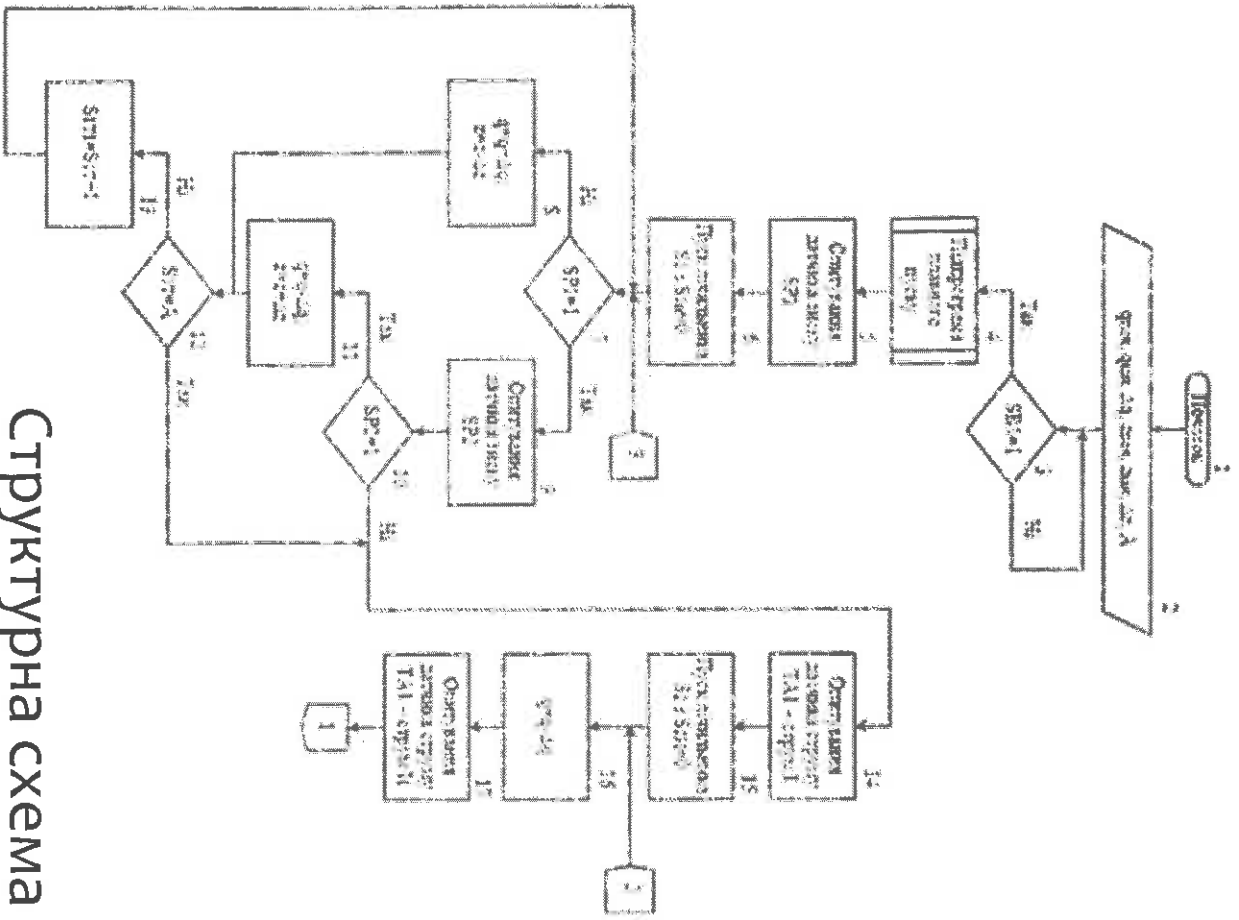
25Гц



Результати моделювання витрат
теплоносія, швидкості двигуна та
споживаної потужності при частоті

50Гц





Структурна схема адаптивного алгоритму управління перетворювачем частоти