

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Інна НЕФЬОДОВА**
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

тема «Електромеханічна система регулювання швидкості із частотним
регулюванням асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором» _____

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-Е21
(шифр групи)

Андрій ЯНКОВИЙ
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Тетяна НІКІТИНА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент роботи

д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Консультант

_____ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) _____
(підпис)

Харків – 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.	9
2	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ	15
3	СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	30
	Висновки	58
	Список використаних джерел	60
	Додатки	63

					ЕМКС 028008 000 ПЗ			
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Електромеханічна система регулювання швидкості із частотним регулюванням асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Янковий А.М.</i>					6	
<i>Перевір.</i>		<i>Нікітіна Т.Б.</i>				<i>БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна БД-Е21</i>		
<i>Т. контр.</i>								
<i>Н. Контр.</i>		<i>Нікітіна Т.Б.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Кузнецов Б.І.</i>						

ВСТУП

У процесі розробки сучасних технічних систем нового покоління та при впровадженні інноваційних технологій особливої уваги набуває питання досягнення високої точності регулювання параметрів руху та забезпечення надзвичайно плавного переміщення виконавчих органів, особливо в умовах малих (повзучих) швидкостей. Саме здатність системи керування забезпечити прецизійне позиціонування і стійке регулювання визначає ефективність реалізації технологічних операцій і, в остаточному підсумку, якість кінцевого продукту чи процесу [1].

Однак на практиці підвищення точності і динамічної стабільності електромеханічних або електротехнологічних систем часто обмежується наявними механічними недосконаlostями у ланцюгу передавання енергії між виконавчим електроприводом та робочим механізмом. Основні проблеми виникають саме в тому випадку, коли система керування працює в умовах широкого частотного діапазону. У таких умовах власні резонансні частоти механічної трансмісії, до складу якої входять вали двигуна, редуктор та кінцевий виконавчий елемент, можуть опинитися в робочій смузі частот керування, що істотно ускладнює досягнення стабільного режиму.

У таких випадках стає неможливим використання спрощених одномасових моделей типу "двигун – навантаження", оскільки необхідно враховувати пружні зв'язки між окремими елементами передавального механізму. Це обумовлює перехід до складніших багатомасових математичних моделей - двох-, трьох-, а іноді й більшої кількості мас, які більш адекватно відображають реальні динамічні властивості системи [2].

Крім того, роботу таких систем додатково ускладнює нелінійна природа зовнішнього тертя, характерна для контактної взаємодії між елементами конструкції або між інструментом і оброблюваним матеріалом. Часто ця нелінійність проявляється у вигляді залежності сили тертя від швидкості

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ковзання, особливо в діапазоні дуже низьких швидкостей, де характер поведінки системи може істотно змінюватися. Такі умови можуть бути нормальним режимом для одних типів механізмів і водночас аварійним для інших, що вимагає особливого контролю.

Ситуація стає ще критичнішою, коли елементи з пружними характеристиками взаємодіють з нелінійною падаючою частиною характеристики зовнішнього тертя. Це може призводити до автоматичної генерації коливань у системі, що не лише не затухають з часом, а й навпаки - мають тенденцію до розростання, приводячи до дестабілізації процесу керування. Такий стан може бути небезпечним для роботи обладнання і потребує особливо ретельного аналізу в процесі проектування та налаштування регуляторів системи приводу [1].

У результаті, для ефективного функціонування електромеханічних систем з високими вимогами до точності позиціонування та плавності ходу, необхідно враховувати як складні динамічні взаємодії між елементами механічної трансмісії, так і особливості нелінійної взаємодії сил тертя, що виникають у робочому середовищі. Це, в свою чергу, формує вимоги до впровадження адаптивних або робастних алгоритмів керування, які здатні працювати в умовах змінних механічних параметрів і мінімізувати вплив резонансних явищ та збурень [3].

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

У сучасних умовах одним із ключових показників технічного та соціального розвитку держави вважається забезпечення надійного та якісного водопостачання як для побутових потреб населення, так і для потреб промислового комплексу. Ефективне функціонування систем водопостачання значною мірою залежить від роботи насосного обладнання та комплексних насосних установок, які є основною ланкою у переміщенні водних ресурсів у задані точки споживання [3].

Насосна установка (НУ) являє собою інтегрований інженерно-технічний комплекс, до складу якого входить насосний агрегат разом з відповідним допоміжним обладнанням. Уся система збирається згідно з певною схемою, що відповідає вимогам конкретного технологічного процесу та спрямована на забезпечення надійного, безперервного і високоефективного функціонування насоса [4].

До складу типової насосної установки можуть входити такі елементи [5]:

- системи попередньої обробки робочого середовища (наприклад, фільтри або сепаратори),
- вузли автоматичного керування та регулювання (на базі ПЛК або частотних перетворювачів),
- контрольно-вимірювальні прилади (манометри, витратоміри, датчики температури тощо),
- пристрої моніторингу стану системи в реальному часі,
- захисне обладнання (реле тиску, термічний захист, зворотні клапани),
- компоненти, що сприяють підвищенню енергоефективності (наприклад, частотно-регульовані приводи або адаптивні системи керування).

Такий системний підхід до побудови насосних установок дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю, надійністю та енерговитратами, що особливо важливо в умовах сучасних вимог до ресурсощадності та автоматизації промислових і комунальних об'єктів.

					ЕМКС 028008 000 ПЗ	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Станом на сьогодні, однією з найбільш актуальних проблем є підвищення енергоефективності насосних агрегатів та насосних установок у цілому, що особливо важливо в умовах зростаючого дефіциту чистої води та поступового погіршення екологічного стану водних об'єктів. Раціональне використання енергетичних ресурсів у водопостачанні стає не лише технічною, а й соціальною проблемою глобального рівня [6].

Одним із найефективніших підходів до вирішення цього завдання є впровадження інтелектуальних електромеханічних систем, які використовують у своїй основі асинхронні електродвигуни, керовані за допомогою програмованих логічних контролерів (PLC), цифрових сигнальних процесорів (DSP), SCADA-систем для збору, обробки та диспетчеризації даних, сучасних бездротових сенсорних мереж, а також відновлюваних джерел енергії.

Значні виклики при розробці таких систем пов'язані з тим, що насосні комплекси часто мають складну архітектуру, розташовані на значних географічних відстанях, мають змінну конфігурацію, часову варіабельність робочих параметрів, а також потребують швидкої адаптації до змін режимів роботи - від дискретних до аналогових сигналів керування, і навпаки. Така гнучкість вимагає впровадження сучасних принципів автоматичного керування, що здатні враховувати всі ці чинники [5].

Значна частина сучасних наукових досліджень у цій галузі зосереджена на задоволенні зростаючих запитів урбанізованих територій і промисловості. У зв'язку з цим структура існуючих мереж водопостачання часто є нераціональною, що ускладнює моніторинг та ефективне управління. Крім того, недостатній обсяг оперативної інформації про технічний стан мережі ускладнює оптимізацію її роботи в режимі реального часу.

Підвищення енергетичної ефективності насосного обладнання є можливим шляхом реалізації комплексу заходів, серед яких: зменшення втрат води в системах, зниження енергетичних витрат на одиницю перекачаного об'єму, оптимізація режимів роботи насосів, застосування приводів із регульованою

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкістю обертання, використання математичного моделювання для передбачення поведінки системи тощо [5].

У підсумку, ефективна модернізація насосних установок та їх перехід на інтелектуальні електромеханічні платформи здатна суттєво підвищити надійність, енергоефективність і адаптивність водопостачальних систем до умов, що постійно змінюються.

У процесі аналізу та оптимізації функціонування систем водопостачання значну роль відіграє математичне моделювання, яке дозволяє формалізувати складні фізичні та технічні процеси, що відбуваються в системі. Математична модель - це сукупність рівнянь, функціональних залежностей і логічних співвідношень, які імітують поведінку реального об'єкта або явища на основі його основних характеристик, параметрів та взаємозв'язків [5].

Сучасні системи водопостачання є надзвичайно складними з інженерної точки зору, адже включають в себе не лише насосні агрегати, трубопроводи, резервуари та регулювальну арматуру, а й програмно-апаратні засоби управління, контролю, моніторингу. Тому математичні моделі таких систем мають комплексний характер - вони є нелінійними, багатозмінними, динамічними і просторово розподіленими, тобто їх параметри змінюються як у часі, так і в просторі. Крім того, деякі процеси мають дискретно-неперервну природу, що ускладнює побудову адекватної універсальної моделі.

Значна складність полягає у тому, що інформація про всі структурні елементи системи водопостачання, їх характеристики та взаємозв'язки часто є неповною або неточною, особливо у випадку застарілих або модернізованих систем, де оновлення документації здійснювалося фрагментарно. У таких умовах повноцінне математичне представлення системи у вигляді строгої моделі стає неможливим без певних гіпотез або спрощень [6].

З огляду на вищезазначене, у практичній діяльності при побудові моделей функціонування систем водопостачання застосовують спрощені підходи, які дають змогу відтворити основні закономірності процесів, нехтуючи

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						11
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

другорядними або менш значущими факторами. Наприклад, у деяких випадках можна допустити стаціонарність потоку, ігноруючи малі коливання тиску або незначну зміну витрати, або ж представити деякі складні динамічні залежності у вигляді лінійних апроксимацій.

Такі спрощені моделі, хоча й не є абсолютно точними, дають змогу ефективно вирішувати задачі оптимізації керування, енергозбереження, запобігання аваріям, планування реконструкції мереж, та виявлення "вузьких місць" у гідравлічній структурі системи [4].

У сфері сучасної автоматизації технічних систем особливу увагу приділяють оптимальному керуванню, що полягає у виборі та реалізації найдоцільнішої стратегії впливу на керований об'єкт із метою досягнення бажаного кінцевого результату за найсприятливіших умов. Цей підхід передбачає врахування початкового стану об'єкта, а також урахування обмежень і ресурсів, доступних у розпорядженні системи.

Під оптимальним керуванням слід розуміти процес прийняття рішень, спрямованих на досягнення максимально ефективного функціонування технічного або технологічного об'єкта, відповідно до заданих критеріїв оптимальності. Ці критерії можуть бути різноплановими - від технічних (наприклад, мінімізація втрат енергії, стабілізація тиску або витрати) до економічних (зменшення експлуатаційних витрат, підвищення ККД насосного агрегату) [5].

Фундаментальною складовою оптимізаційного підходу до керування є етап стратегічного планування, під час якого здійснюється вибір найприйнятніших варіантів розподілу ресурсів та енергетичних потоків, що дозволяє досягти максимальної віддачі при найменших затратах. Раціональне планування в цьому контексті пов'язане з порівнянням очікуваних результатів діяльності системи та витрат на досягнення цих результатів, що уможливорює розв'язання як технічних, так і соціально-економічних завдань [6].

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зокрема, у водопровідно-насосних системах, які забезпечують подачу води як для побутових, так і для промислових потреб, питання оптимізації керування набуває особливої актуальності. Найважливішими аспектами тут виступають [7]:

- регулювання робочого тиску в системі для уникнення перевитрат води та запобігання гідродарам;
- підвищення енергоефективності роботи насосів, шляхом зменшення споживання електроенергії за рахунок регулювання швидкості обертання двигунів;
- мінімізація експлуатаційних витрат при збереженні надійності та безперервності водопостачання.

У світлі останніх технічних досліджень і публікацій у цій галузі пропонуються численні підходи до оптимізації роботи насосного обладнання. До них належать [6]:

- впровадження частотного регулювання швидкості обертання електродвигунів;
- адаптивні алгоритми регулювання, що реагують на зміни споживання в реальному часі;
- централізоване або децентралізоване управління насосними станціями з використанням SCADA-систем;
- впровадження математичних моделей, що дозволяють передбачати зміну навантаження та ефективно розподіляти потужності.

Таким чином, оптимальне керування насосними установками є комплексним завданням, яке охоплює як технічні, так і організаційні аспекти функціонування систем водопостачання. Його реалізація є запорукою ефективного використання ресурсів, зниження витрат, підвищення якості послуг і екологічної безпеки.

На сьогодні найрозповсюдженішим підходом до керування насосними установками залишається використання систем підтримки сталого тиску, які функціонують на базі частотно-регульованого електроприводу. Застосування

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

цього методу дозволяє досягти певного рівня енергоощадності за рахунок зниження частоти обертання насосного агрегату в залежності від навантаження. Однак така стратегія не гарантує постійну роботу поблизу оптимальної робочої точки, в якій насос функціонує з максимально можливим коефіцієнтом корисної дії (ККД). Це обмежує загальний потенціал енергозбереження [5].

Інтеграція принципів екстремального керування у процес функціонування насосних систем відкриває можливості для більш ефективної експлуатації. Зокрема, доцільним є об'єднання алгоритмів, що керують роботою самого насосного агрегату з точки зору ККД, та методів регулювання втрат електроенергії у приводі, де використовується асинхронний двигун. Такий комбінований підхід дозволяє вийти на більш високий рівень енергоефективності всієї установки, шляхом динамічного підлаштування до змін у навантаженні або гідравлічних умовах [6].

У напрямку оптимального керування насосними станціями особливої актуальності набуває задача оптимізації споживання електроенергії шляхом формування та реалізації раціонального графіка водоспоживання. Такий підхід дозволяє мінімізувати пікові навантаження на насосне обладнання, забезпечити його роботу в режимах з найменшими втратами енергії, а також уникати надмірної зношеності агрегатів. Оптимізація навантаження на основі прогнозованих або реальних даних про споживання води є ефективним інструментом сучасної автоматизованої системи диспетчеризації та управління [7].

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						14
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Насосна установка за своєю суттю являє собою складну динамічну електромеханічну систему, яка характеризується багатопараметричною, нелінійною поведінкою. Її функціонування базується на взаємодії та одночасному протіканні процесів різної фізичної природи - електричних, механічних і гідравлічних. Такий рівень інтеграції фізичних процесів створює значні труднощі при формалізації математичних моделей, які могли б повною мірою відтворити реальну динаміку системи [7].

На сьогоднішній день в науково-прикладній практиці ще не сформовано єдину універсальну математичну модель, яка б комплексно враховувала всі гідромеханічні ефекти, включаючи турбулентність потоку, втрати на локальних опорах, динаміку зміни тиску та витрати при нерівномірному навантаженні тощо. Через складність побудови точної аналітичної моделі в більшості випадків використовуються апроксимовані або спрощені описові підходи [8].

Зокрема, для моделювання перехідних процесів в одинарній насосній установці часто використовується нелінійне диференціальне рівняння першого порядку, яке пов'язує змінні витрати, тиску та моменту, прикладеного до ротора насоса. Незважаючи на обмеження такої моделі, вона дозволяє дослідити основні динамічні характеристики системи та провести попереднє аналізування стабільності або ефективності керування насосом в умовах змінного навантаження.

Тому точність розрахунків, що базуються на таких спрощеннях, багато в чому залежить від правильно обраних граничних умов, емпіричних коефіцієнтів та дослідного налаштування параметрів керування [9].

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0H}}{\chi\omega_H^2} \omega^2 - \frac{H_{ст}}{\chi} - \frac{1}{\chi} (a_H + a) Q^2; \quad (2.1)$$

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$H = \frac{H_{0H}}{\chi\omega_H^2} \omega^2 - a_H Q^2; \quad (2.2)$$

$$M_c = \frac{\rho g Q H}{\eta_{нас} \omega} \quad (2.3)$$

Для побудови математичної моделі насосної установки було використано метод аналогій між різними фізичними середовищами, зокрема - між гідравлічними та електричними колами. Такий підхід базується на законах подібності, які дозволяють інтерпретувати змінні гідравлічного середовища в еквівалентній електричній формі, що значно спрощує аналітичне представлення складних динамічних процесів у системі [8].

Завдяки використанню цієї методології насосна установка розглядається як аналог електричного кола, де тиск виконує роль напруги, витрата рідини - аналог струму, гідравлічний опір - аналог електричного опору, а інерційність потоку та ємність трубопроводів - відповідно до індуктивності та ємності в електричних ланцюгах. Такий підхід дозволяє не лише формалізувати гідродинамічні процеси, але й застосовувати існуючі інструменти електричних схем для моделювання, аналізу і синтезу систем керування насосами.

У результаті отримано еквівалентну схему заміщення, що є структурованим представленням динаміки насосної установки з урахуванням впливу основних фізичних параметрів. Ця схема включає в себе моделі напірних втрат, інерційності потоку, дроселювання, зворотного тиску та динаміки двигуна, який приводить насос в дію [10].

Такий підхід є ефективним при моделюванні складних режимів роботи, дозволяє реалізувати симуляційні експерименти в середовищах типу MATLAB/Simulink або іншому програмному забезпеченні для динамічного моделювання, забезпечуючи якісну оцінку стабільності, чутливості та енергоефективності роботи насосної установки [9].

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

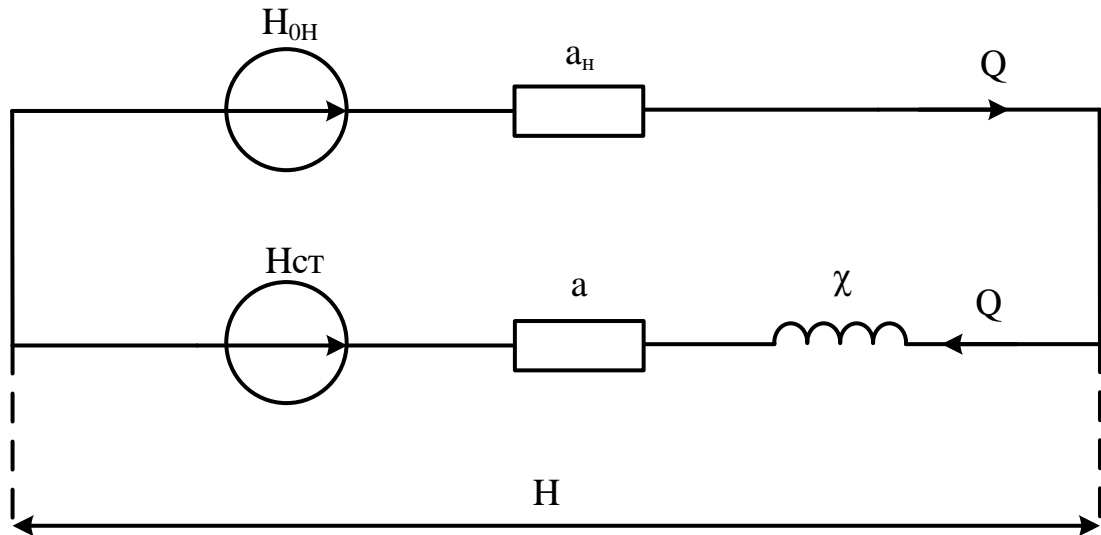


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема

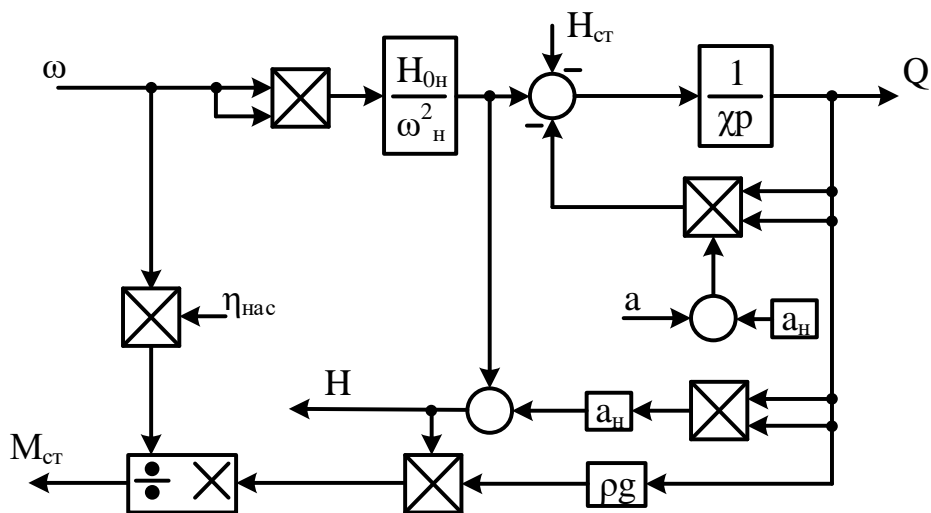


Рисунок 2.2 – Структурна схема

У тих випадках, коли потрібно забезпечити значне підвищення тиску в системі водопостачання або іншій гідравлічній мережі, ефективним технічним рішенням є послідовне з'єднання декількох насосів. Такий підхід дозволяє накопичити гідравлічний напір, що створюється кожним окремим насосом, що працює в ланцюжку [10].

Гідравлічна суть цього принципу полягає в тому, що загальний напір у системі, яка живиться з двох (або більше) насосів, встановлених один за одним по потоку, визначається арифметичною сумою напорів кожного з насосів при фіксованому об'ємі витрати. При цьому витрата в усіх насосах залишається однаковою, оскільки вони працюють у єдиному потоці рідини [8].

Загальна характеристика такої конфігурації будується додаванням вертикальних ординат (напорів) індивідуальних насосних характеристик при незмінному значенні абсциси (витрати). Таким чином формується підсумкова напірна характеристика системи, яка відображає сумарну здатність установок долати гідравлічний опір мережі [9].

Особливо ефективно послідовне з'єднання насосів у системах з крутою характеристикою навантаження - тобто, в мережах, де для незначного збільшення витрати необхідно значне зростання тиску. В таких випадках навіть помірне нарощування тиску за рахунок багатоступеневого нагнітання дозволяє стабілізувати роботу установки та забезпечити необхідні гідравлічні параметри.

Цей метод активно застосовується [10]:

- у високонапірних системах водопостачання;
- при подачі рідини на велику висоту;
- у промислових установках, де необхідне багатоступеневе стиснення робочого середовища.

Таким чином, послідовне з'єднання насосів є інженерно обґрунтованим і ефективним способом підвищення тиску, що дозволяє адаптувати насосну установку до жорстких вимог зовнішньої гідравлічної мережі [9].

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{01H}}{\chi\omega_{H1}^2} \omega_1^2 + \frac{H_{02H}}{\chi\omega_{H2}^2} \omega_2^2 - \frac{H_{ст}}{\chi} - \frac{1}{\chi} (a_{H1} + a_{H2} + a) Q^2; \quad (2.4)$$

$$H_1 = \frac{H_{01H}}{\chi\omega_{H1}^2} \omega_1^2 - a_{H1} Q^2; \quad (2.5)$$

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$H_2 = \frac{H_{02H}}{\chi \omega_{H2}^2} \omega_2^2 - a_{H2} Q^2; \quad (2.6)$$

$$M_{c1} = \frac{\rho g Q H_1}{\eta_{нас1} \omega_1}; \quad (2.7)$$

$$M_{c2} = \frac{\rho g Q H_2}{\eta_{нас2} \omega_2}; \quad (2.8)$$

$$H = H_1 + H_2; \quad (2.9)$$

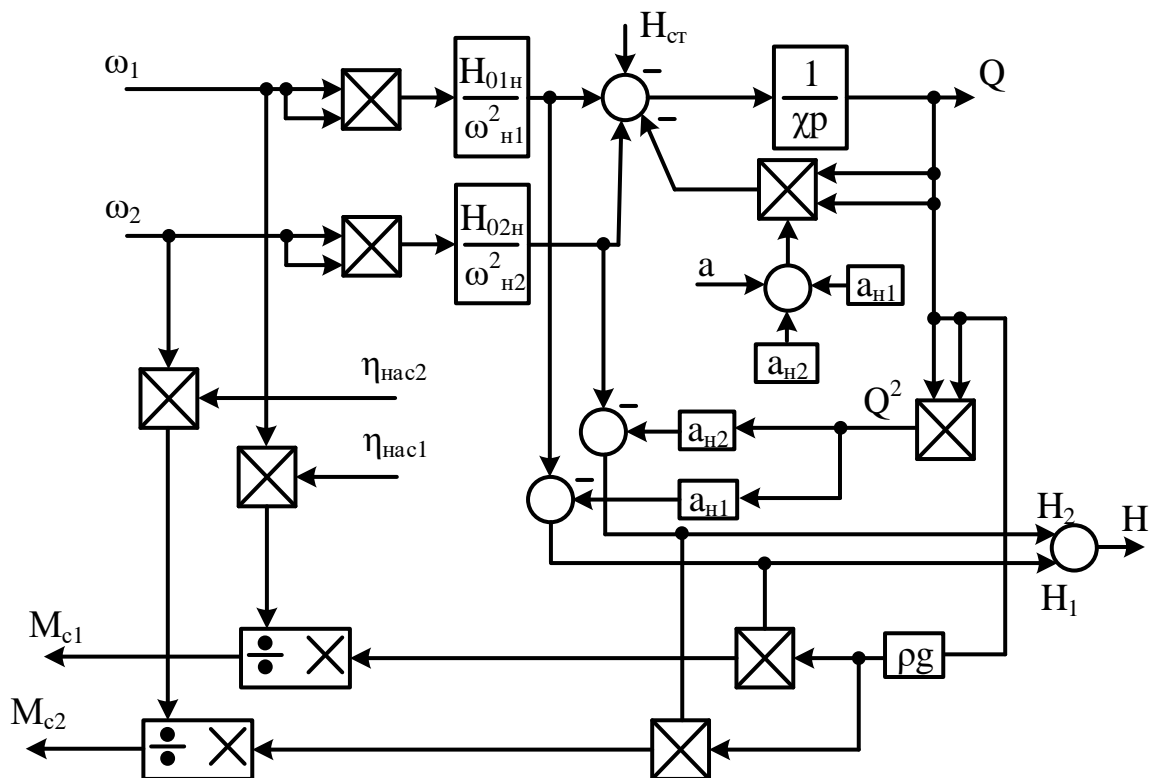


Рисунок 2.3 – Структурна схема

У випадках, коли продуктивності одного насоса недостатньо для забезпечення необхідного об'єму перекачуваної рідини або стабільного водозабезпечення в системі, доцільним є використання паралельного з'єднання

декількох насосів. Такий підхід дозволяє розширити діапазон подачі без істотного збільшення напору. Він широко застосовується в системах водопостачання, зрошення, тепlopостачання, а також у промислових технологічних процесах, де потрібна варіативність витрати [11]:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{H_{01H}}{\chi_1 \omega_{H1}^2} \omega_1^2 + \frac{a_{H1} Q_1^2}{\chi_1} - \frac{H_{CT}}{\chi_1}; \quad (2.10)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{H_{02H}}{\chi_2 \omega_{H2}^2} \omega_2^2 + \frac{a_{H2} Q_2^2}{\chi_2} - \frac{H_{CT}}{\chi_2}; \quad (2.11)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H}{\chi} - \frac{H_{CT}}{\chi} - \frac{aQ^2}{\chi}; \quad (2.12)$$

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad (2.13)$$

$$M_{c1} = \frac{\rho g Q_1 H}{\eta_{Hac1} \omega_1}; \quad (2.14)$$

$$M_{c2} = \frac{\rho g Q_2 H}{\eta_{Hac2} \omega_2}; \quad (2.15)$$

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

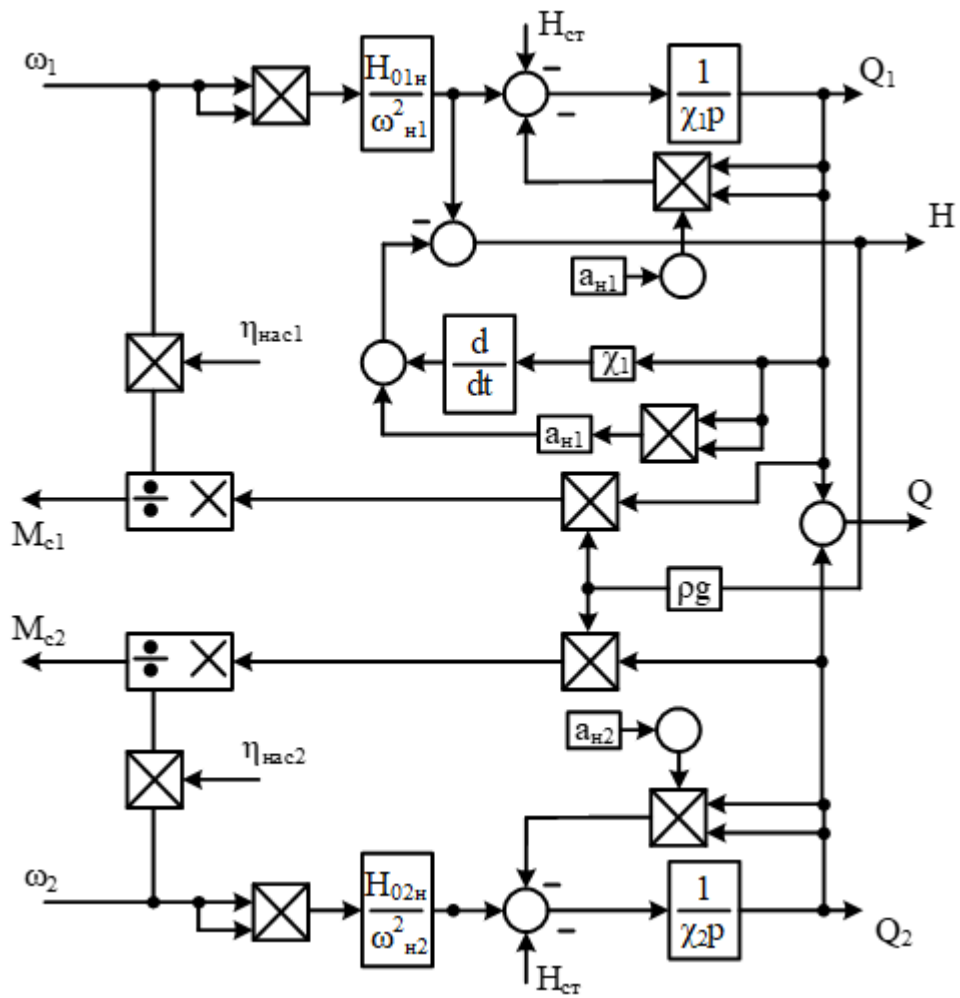


Рисунок 2.4 – Структурна схема

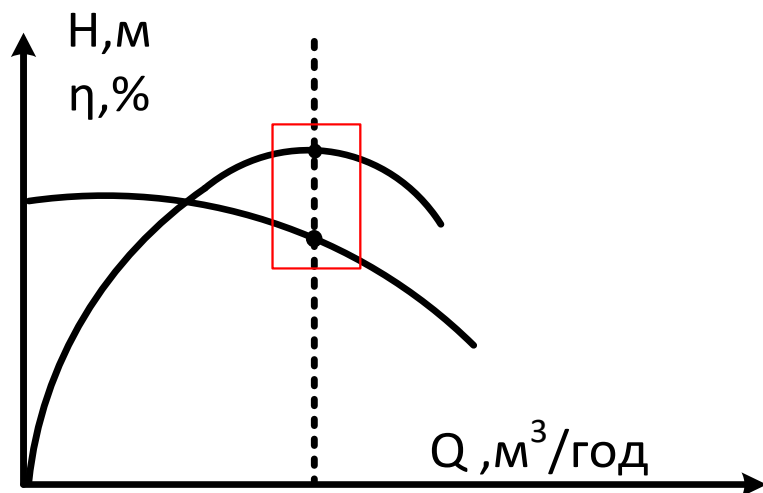


Рисунок 2.5 – Каталожні характеристик насосу

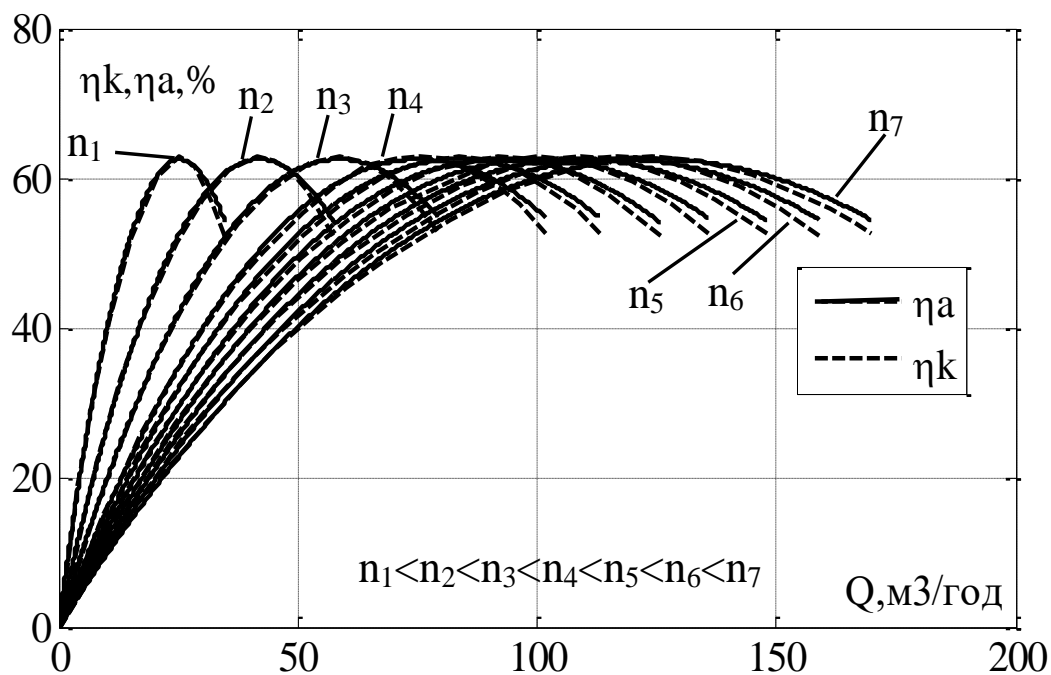


Рисунок 2.6 – Каталогні статичні характеристики

$$\eta_a = a_1(\omega_c / \omega_1)^2 Q^2 + (\omega_c / \omega_1) Q, \quad (2.16)$$

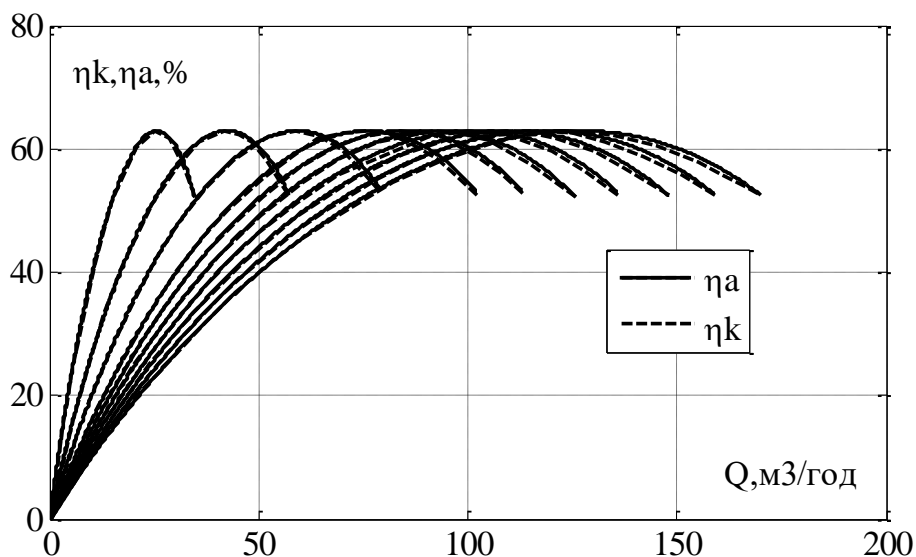


Рисунок 2.7 – Каталогні статичні характеристики

$$\eta_a = a_2(\omega_c / \omega_1)^4 Q^4 + b_2(\omega_c / \omega_1)^3 Q^3 + c_2(\omega_c / \omega_1)^2 Q^2 + d_2(\omega_c / \omega_1) Q, \quad (2.17)$$

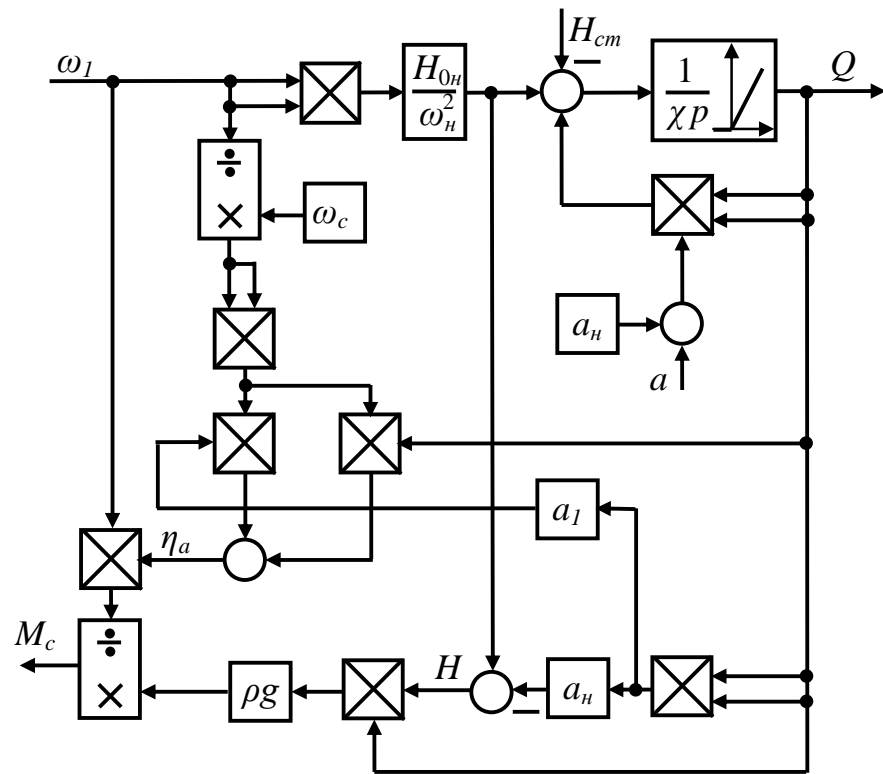


Рисунок 2.8 – Структурна схема насосу

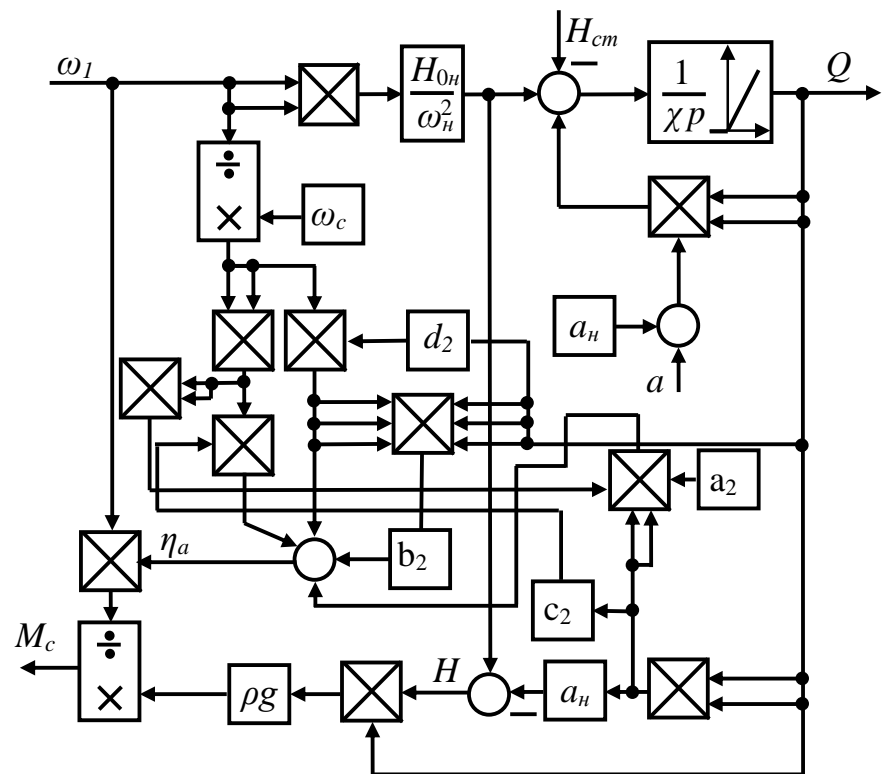


Рисунок 2.9 – Структурна схема насосу

Зазначена модель є основою для подальшого порівняння з замкненими системами керування, де впроваджуються інтелектуальні або класичні регулятори. Вона дозволяє визначити базові характеристики поведінки насосної установки в умовах відсутності зворотного контролю - зокрема, зміну тиску на виході при змінному навантаженні або варіації параметрів живлення приводу.

У наступному розділі буде представлено структурну реалізацію цієї математичної моделі в середовищі MATLAB/Simulink, що дає змогу виконати чисельне моделювання процесів у системі та оцінити її динамічні характеристики за різних сценаріїв роботи [10].

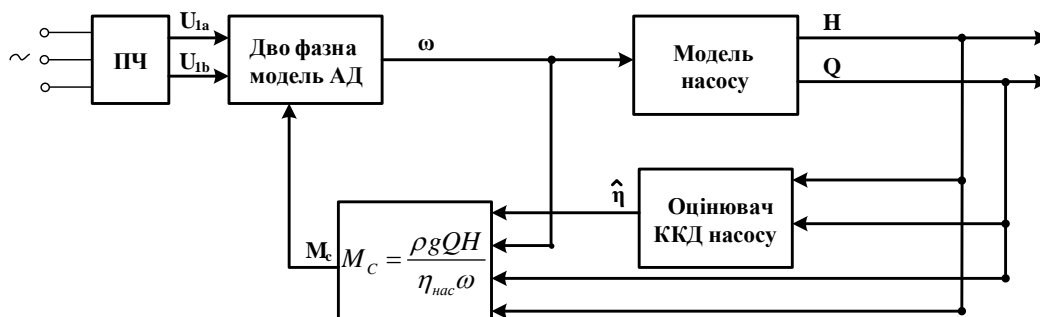


Рисунок 2.19 – Математична модель розімкненої системи

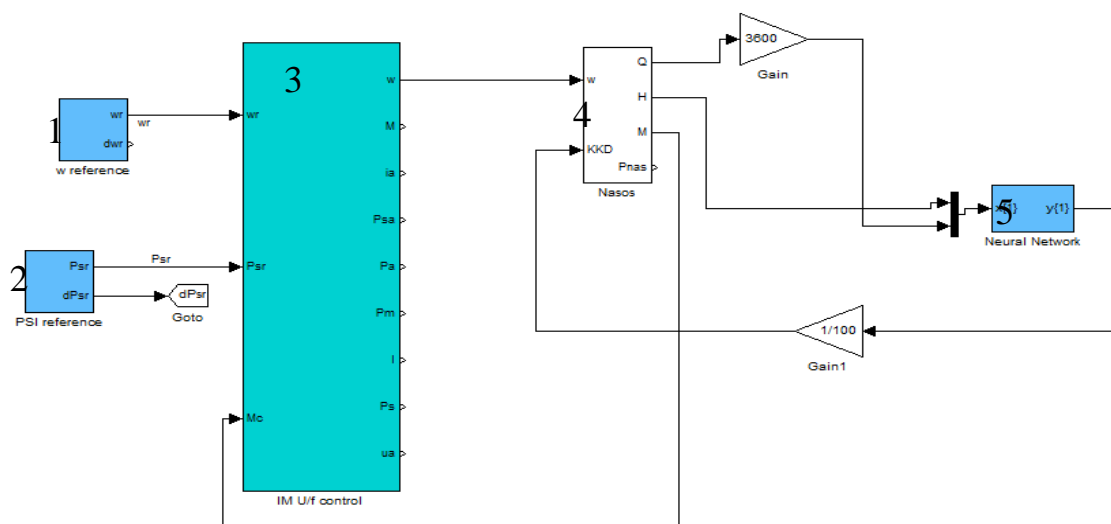


Рисунок 2.20 – Simulink модель розімкненої системи

Математичне моделювання асинхронного електродвигуна базується на описі його електромагнітних процесів у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь. Для точного аналізу динамічних характеристик двигуна ці рівняння формуються у фіксованій системі координат, пов'язаній зі статором, яку умовно позначають як систему координат α - β .

У цьому підході змінні струму, напруги та потокозчеплення трансформуються до прямокутної двовісної системи координат, що дозволяє уникнути періодичних коливань змінних, характерних для трифазних систем. Така трансформація спрощує побудову математичної моделі, зменшує складність симуляційних обчислень та дозволяє легко реалізувати моделі у середовищах типу MATLAB/Simulink [11].

Нелінійність моделі обумовлена взаємним зв'язком між електромагнітними величинами двигуна (зокрема, потокозчепленнями та струмами) та залежністю моменту електромагнітної взаємодії від миттєвих значень струмів у статорі й роторі. Крім того, у модель можуть бути включені елементи, що враховують ковзання ротора, механічні втрати, інерційні характеристики навантаження, а також впливи, пов'язані з тертя або нагріванням.

Така система рівнянь забезпечує адекватне відтворення електромеханічних процесів, які відбуваються у приводі в реальному часі, та є основою для побудови схем векторного або скалярного керування [12].

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} - \beta \omega_p \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \quad (2.18)$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} + \beta \omega_p \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \quad (2.19)$$

$$\frac{d\psi_{2a}}{dt} = -\alpha \psi_{2a} + \omega_p \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \quad (2.20)$$

$$\frac{d\psi_{2b}}{dt} = -\alpha\psi_{2b} - \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \quad (2.21)$$

$$M = \frac{3 L_m}{2 L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \quad (2.22)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{cr}), \quad (2.23)$$

$$\alpha = R_2 / L_2, \quad (2.24)$$

$$\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2, \quad (2.25)$$

$$\beta = L_m / \sigma L_2, \quad (2.26)$$

$$\gamma = R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m, \quad (2.27)$$

$$u_{1a} = u_m \cos \Theta, \quad (2.28)$$

$$u_{1b} = u_m \sin \Theta, \quad (2.29)$$

$$\Theta = 2\pi \int_0^t f dt, \quad (2.30)$$

$$u_m^* = u_0 + (u_{mn} - u_0)(f^*)^2 / f_H^2, \quad (2.31)$$

У системі автоматичного керування параметри сигналів, що подаються на вхід перетворювача частоти, підлягають апаратному та програмному обмеженню

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з метою забезпечення безпечного та стабільного функціонування приводу. Зокрема, максимальне значення частоти керуючого сигналу не перевищує 50 Гц, що відповідає стандартній частоті живлення мережі, а гранична амплітуда напруги обмежується величиною 310 В, що зазвичай відповідає піковому значенню фазної напруги для мережі 220 В (ефективне значення).

Динаміка формування цих сигналів у системі керування враховується через моделювання інерційності каналів частоти та амплітуди. Для цього використовуються аперіодичні ланки першого порядку (одноланкові інерційні елементи), кожна з яких характеризується малою сталою часу, що відображає швидке реагування системи на зміни вхідного сигналу. Таке представлення дає змогу врахувати запізнення у формуванні реальних керуючих впливів через внутрішню динаміку виконавчих контурів перетворювача частоти, а також дозволяє адекватно моделювати поведінку системи при змінних навантаженнях та в перехідних процесах [14]

$$f = \frac{1}{T_{\mu 1} p + 1} f^*, \quad (2.32)$$

$$u_m = \frac{1}{T_{\mu 2} p + 1} u_m^*. \quad (2.33)$$

У процесі системного аналізу функціонування насосного обладнання у складних умовах експлуатації, з урахуванням змін навантаження, параметрів середовища та особливостей гідравлічної мережі, виникла необхідність удосконалення існуючих математичних моделей. Стандартні каталожні характеристики насосів, як правило, надають лише обмежене уявлення про їхню поведінку в динамічних умовах. Тому з метою підвищення точності симуляційних і проектувальних розрахунків, розроблено уточнені математичні моделі, які базуються на використанні апроксимаційних функцій для відображення

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нелінійних залежностей між основними змінними параметрами: подачею, напором, потужністю, а також коефіцієнтом корисної дії [9].

Зокрема, функціональні залежності між продуктивністю насоса та напором або ККД, отримані шляхом апроксимації експериментальних або каталожних даних, дозволяють перейти від суто табличних до аналітично описаних моделей. Це надає можливість гнучко моделювати зміни у системі при відхиленнях від номінальних режимів, у тому числі внаслідок старіння обладнання, змін тиску в мережі, температури робочого середовища, чи зміни режиму керування приводом [10].

Уточнені моделі враховують не лише основні гідродинамічні характеристики насосів, але й дозволяють оцінити вплив зовнішніх регулюючих впливів, зокрема частотного керування обертами електропривода. Також вони дають змогу проаналізувати перехідні процеси в режимах запуску, зупинки, аварійного навантаження та динамічних змін споживання.

Використання цих моделей забезпечує [11]:

- підвищення достовірності результатів моделювання насосних систем у різноманітних конфігураціях (одинарні, паралельні, послідовні схеми);
- можливість інтеграції з системами автоматичного керування (в тому числі на базі PLC, SCADA або цифрових контролерів);
- реалістичну оцінку ефективності енергоспоживання, що є критично важливим у контексті сучасних вимог до енергоефективності промислових об'єктів.

Таким чином, розширене математичне представлення насосних установок стає не лише теоретичним інструментом, а й практичним засобом для оптимізації їхньої роботи, вибору режимів експлуатації, оцінки надійності та підвищення економічної ефективності загальної водогосподарської системи.

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						29
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Під час експлуатації насосного обладнання одним із головних технологічних викликів є стабілізація тиску в межах заданих значень для забезпечення нормального функціонування об'єкта, що обслуговується системою. Проте, фокусуючись виключно на підтримці сталого тиску в обраній точці мережі, інженери та оператори часто стикаються з проблемою втрати енергетичної ефективності. Це пов'язано з тим, що коефіцієнт корисної дії насоса (ККД) не є постійним, а змінюється залежно від робочої точки, розміщеної на кривих статичних характеристик насосного агрегату. Іншими словами, робота в умовах підтримання фіксованого тиску може змушувати насос функціонувати у зонах зниженого ККД, що призводить до перевитрати енергії [14].

Багато наукових досліджень, присвячених підвищенню енергоефективності насосних установок, здебільшого зосереджені на задачі зменшення споживаної електроенергії шляхом максимізації ККД обладнання. Проте ці підходи нерідко реалізуються без урахування реальних технологічних потреб — зокрема, таких як гарантоване забезпечення заданого тиску або витрати в точках споживання. У результаті система може працювати з вищим ККД, але при цьому порушуються критичні технологічні параметри, що веде до погіршення якості обслуговування процесів або до аварійних режимів.

Таким чином, у практиці проєктування та експлуатації насосних станцій все актуальнішою стає потреба у створенні інтелектуальних систем керування, які б не лише орієнтувалися на мінімізацію енергоспоживання, а й враховували обмеження на тиск, витрату, продуктивність та інші технологічні характеристики. Такий підхід вимагає поєднання методів оптимального керування з динамічним аналізом гідравлічної мережі, використання датчиків реального часу та інтеграції з цифровими системами керування (PLC, SCADA, IoT-моніторинг) [15].

Розробка адаптивних, самонавчальних або комбінованих систем керування, які здатні одночасно реагувати на технологічні запити та мінімізувати втрати

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергії, є стратегічно важливим напрямом у сфері модернізації систем водопостачання та ресурсозберігаючих технологій [16].

Технологічна частина критерію ефективності функціонування системи повинна бути зорієнтована на забезпечення мінімального відхилення між встановленим (еталонним) значенням тиску та фактичним напором, що формується на виході насосного обладнання. Такий підхід дозволяє гарантувати не лише стабільну роботу гідравлічної мережі, але й дотримання технологічних вимог до якості та безперервності водопостачання в реальному режимі експлуатації [17].

$$\Delta H(t) = |H^*(t) - H_n(t)|, \quad (3.1)$$

$$\Delta \eta(t) = \eta^*(t) - \hat{\eta}(t), \quad (3.2)$$

$$I = \int_0^t (\Delta H(t) + k_r \Delta \eta(t)) dt \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \hat{\eta} = & c(\text{th}((Hw_{11} + m_{21}) / l_{21})w_1 + \text{th}((Hw_{21} + m_{22}) / l_{22})w_2 + \\ & + \text{th}((Hw_{31} + m_{23}) / l_{23})w_3 + \text{th}((Hw_{41} + m_{24}) / l_{24})w_4 + \\ & + \text{th}((Hw_{51} + m_{25}) / l_{25})w_5 + m) \end{aligned} \quad (3.4)$$

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення енергоефективної та стабільної роботи насосної установки доцільно впровадити оптимальний регулятор, структура і функціонування якого базуються на сучасних методах інтелектуального керування. Основними вхідними параметрами для такого регулятора є вимірювані в режимі реального часу значення тиску в системі (позначається як H) та поточної кутової швидкості обертання робочого колеса насоса (ω) [18].

На основі вимірюваного значення тиску формується сигнал, який надходить до нейромережевого модуля - елемента системи, що здійснює обчислення умовного критерію оптимальності з урахуванням багатofакторних впливів. Паралельно з цим формується сигнал похибки ΔH , який є різницею між заданим референтним тиском і фактичним значенням тиску на виході установки. Сума референтного значення тиску та розрахованої похибки подається на вхід другої нейронної мережі, яка виконує функцію апроксимації зворотної залежності для визначення оптимального значення кутової швидкості обертання [14].

Таким чином, на основі адаптивної нейромережевої моделі вдається отримати керуючий сигнал, який забезпечує мінімізацію відхилення тиску від бажаного рівня при одночасному дотриманні критерію енергоефективності, що є ключовим для стабільної та економічної експлуатації насосної системи в умовах змінного водоспоживання [18].

У даному дослідженні було сформульовано інтегрований критерій оптимального керування насосною установкою, який поєднує дві ключові складові - технологічну (забезпечення стабільності заданого тиску у гідравлічній системі) та енергетичну (максимізація ефективності перетворення енергії насосом). На основі цього критерію запропоновано систему керування, що дозволяє, для кожної поточної робочої точки насоса, знайти баланс між мінімальним енергоспоживанням та відповідністю тиску заданому значенню [19].

Було спроектовано автоматизовану систему керування, у складі якої реалізовано модулі оцінки ККД, блок оптимізації тиску та регулятор обертання приводу. Така система забезпечує стабільність до змінних умов роботи - зокрема,

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при флуктуаціях тиску у мережі або зміні навантаження - що значно підвищує загальну енергоефективність установки [19].

Практична реалізація запропонованої архітектури дозволяє [20]:

- автоматично коригувати швидкість обертання електродвигуна насоса відповідно до зміни технологічного навантаження;
- утримувати напір у заданому діапазоні навіть за складних умов експлуатації;
- зменшити втрати енергії завдяки роботі в області оптимального ККД.

Таким чином, запропонований підхід може слугувати основою для створення систем керування, орієнтованих на зниження енерговитрат та покращення якості регулювання гідравлічних параметрів.

Використання математичного моделювання є одним з найбільш ефективних інструментів для попереднього аналізу роботи розроблених автоматизованих систем. Воно дозволяє не лише верифікувати працездатність функціональних алгоритмів, а й здійснити кількісну оцінку ефективності енергоспоживання системи в різноманітних умовах експлуатації. Це, своєю чергою, дає змогу ще на етапі проектування приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації технічних і керуючих параметрів[20].

З метою реалізації чисельного експерименту було обрано потужний інструментарій - програмне середовище MATLAB у поєднанні з його візуальним середовищем моделювання Simulink, яке є зручним для побудови схемно-орієнтованих моделей складних електромеханічних і гідравлічних систем. Саме в цьому середовищі було створено і протестовано модель насосної установки.

У якості об'єкта дослідження обрано відцентровий насос, технічні характеристики якого відповідають реальним умовам промислової експлуатації.

Основні параметри обраного насоса такі[21]:

- Максимальна споживана потужність - 30 кВт;
- Робочий напір - до 50,5 м;
- Продуктивність - 160 м³/год;

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- Коефіцієнт корисної дії (ККД) - 80,2%;
- Частота обертання вала - 2900 об/хв.

Такий рівень деталізації дозволяє адекватно змоделювати як енергетичні, так і динамічні процеси в системі, з урахуванням реальних експлуатаційних обмежень та навантажень.

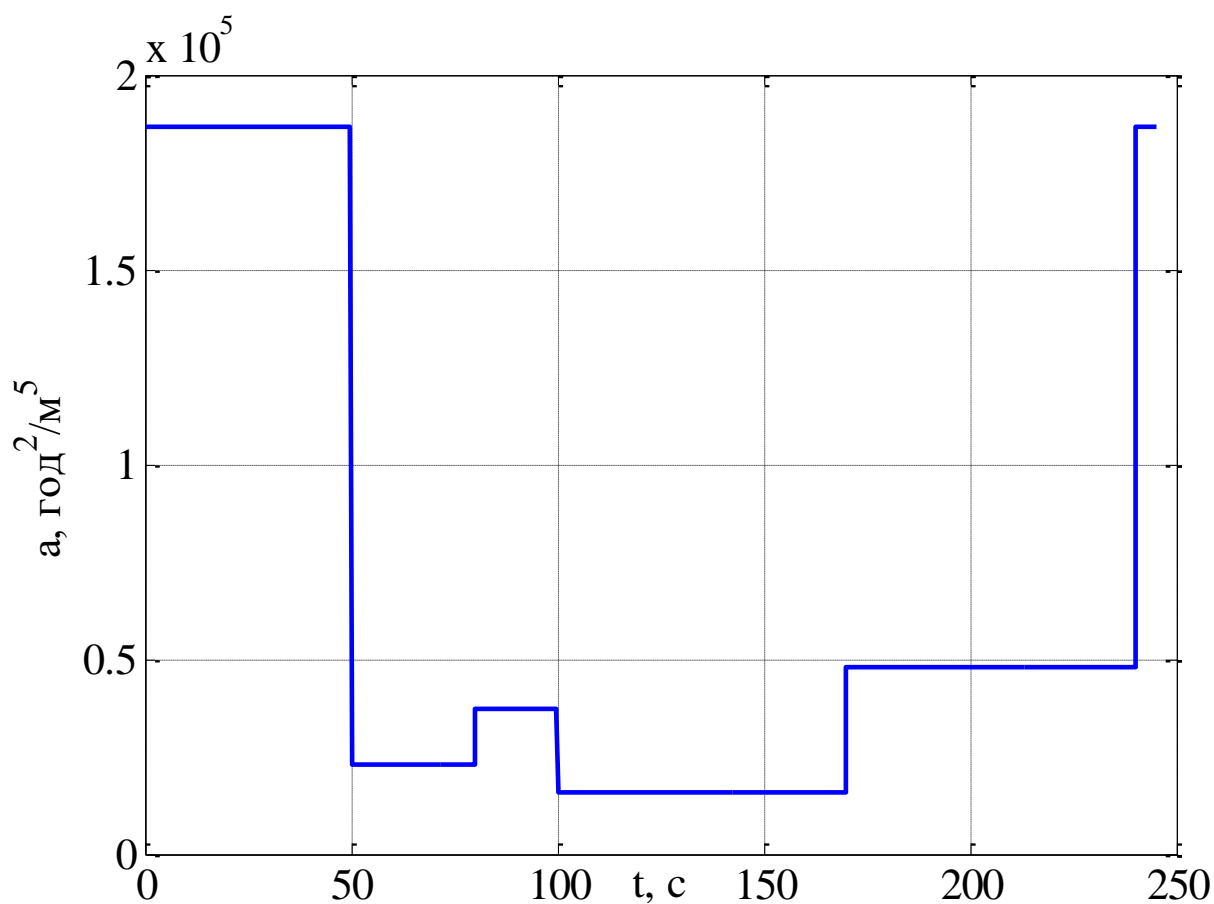
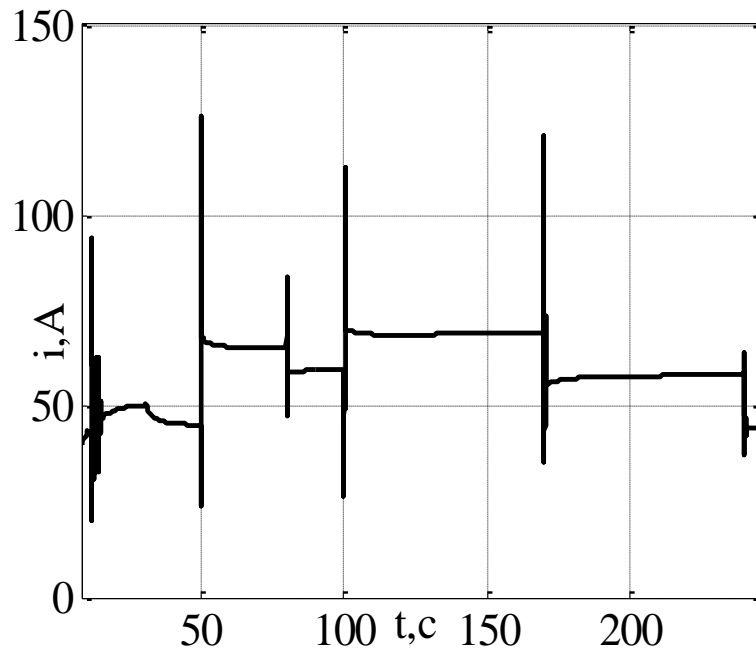
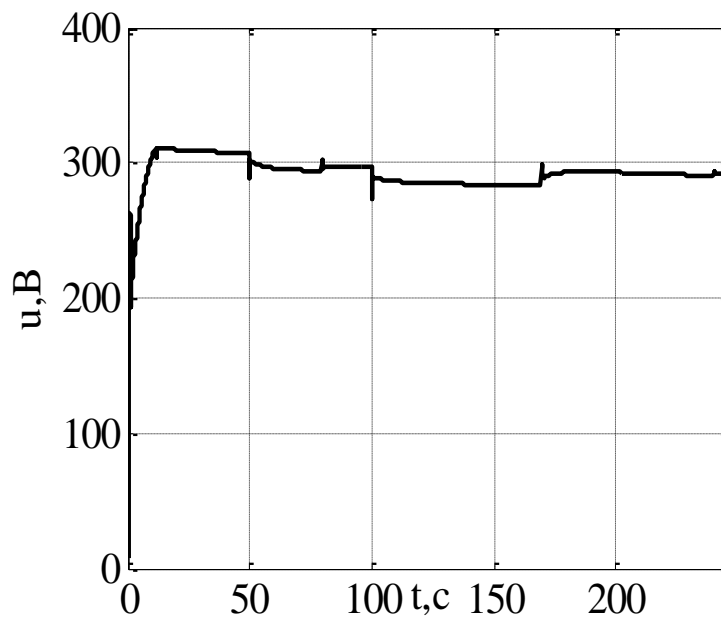


Рисунок 3.3 – Графік зміни опору

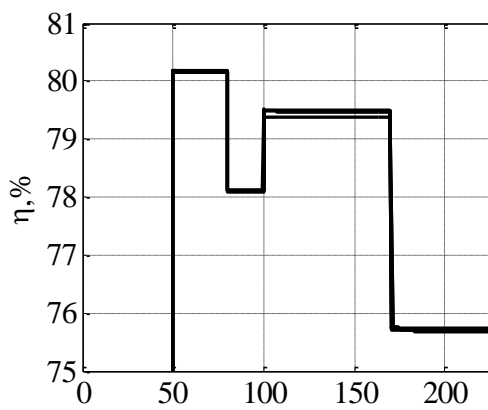


а

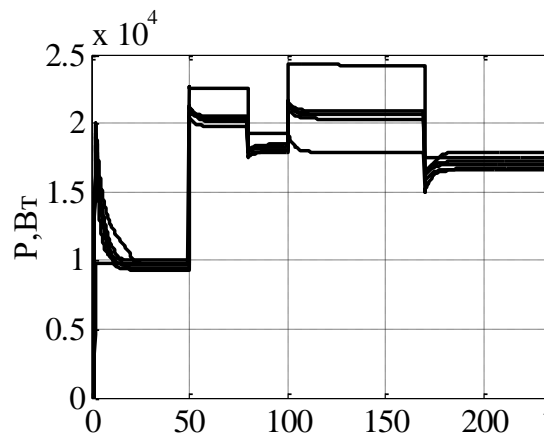


б

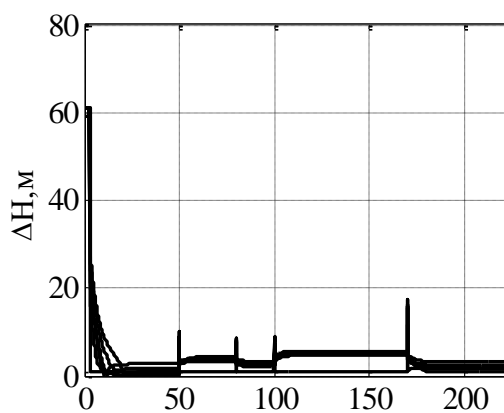
Рисунок 3.4 – Перехідні процеси: а) –значення статора; б) – значення статора



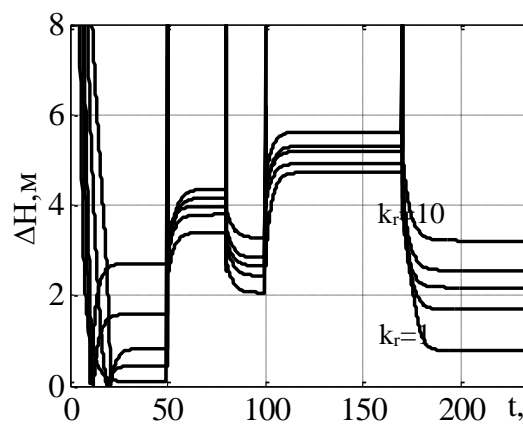
а)



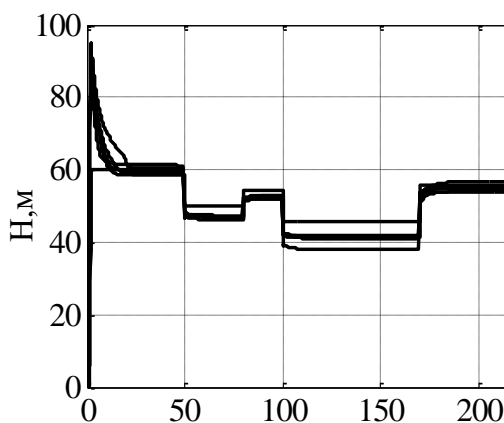
б)



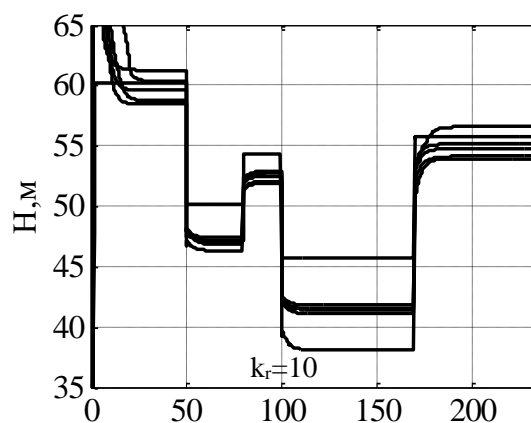
в)



г)



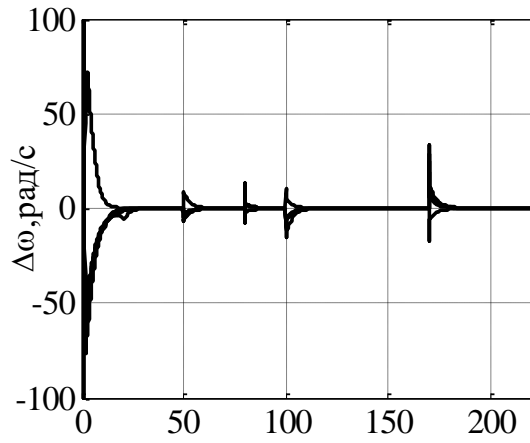
д)



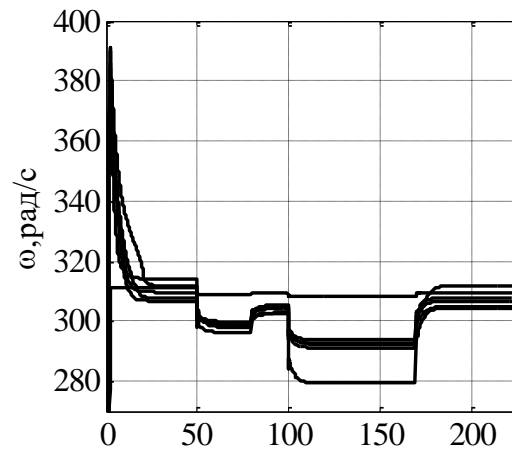
е)

Рисунок 3.5 – Результати моделювання: а) –процес ККД насосу; б) – потужності насосу; в,г) – похибка по тиску д,е) –тиск насосу

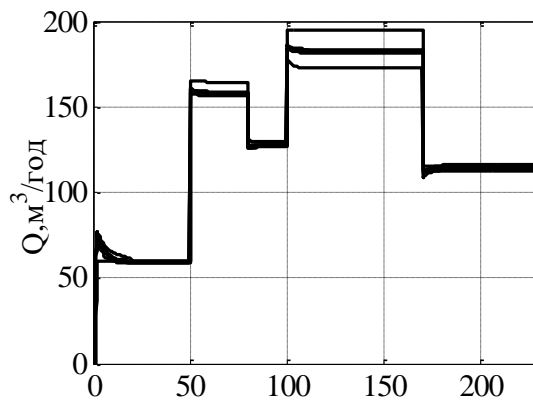
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



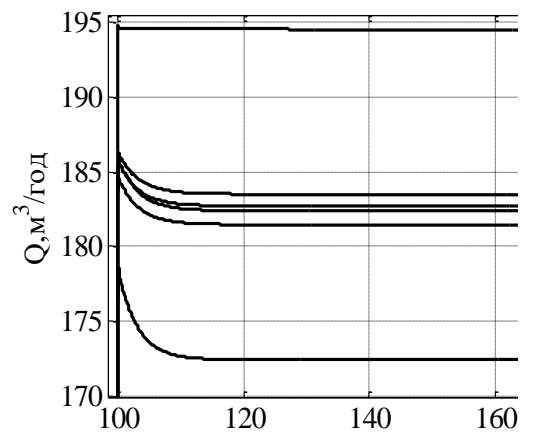
а)



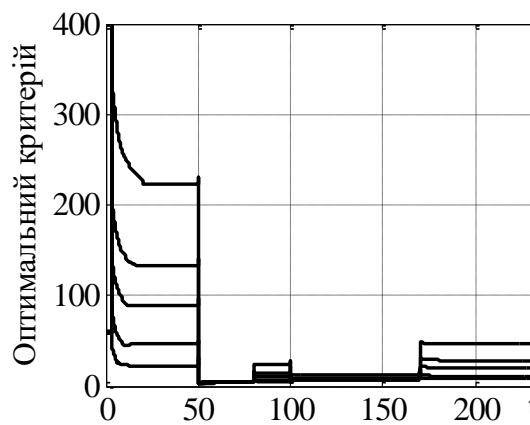
б)



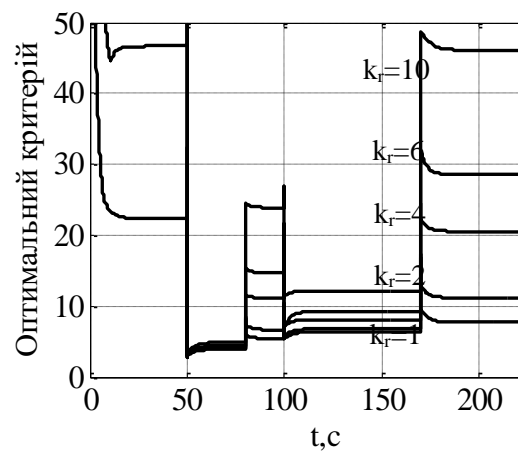
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.6 – Результати моделювання: а) – похибка по швидкості; б) – швидкість насосу; в,г) – продуктивності насосу; д,е) – оцінка похибки

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У процесі моделювання системи автоматичного керування насосною установкою із врахуванням стрибкоподібного закону зміни гідравлічного опору було отримано низку важливих результатів, що дозволяють оцінити ефективність розробленого оптимального регулятора. Зроблено наступні висновки [21]:

- Точність регулювання швидкості обертання двигуна. У кожній змінній робочій точці, незалежно від характеру змін гідравлічного навантаження, спостерігається, що похибка по швидкості прямує до нуля. Це свідчить про коректну роботу розробленого алгоритму управління: регулятор здатен своєчасно та адекватно адаптувати частоту обертання асинхронного електродвигуна насоса до нових умов експлуатації, підтримуючи ефективну робочу точку системи.

- Підвищення енергоефективності. Згідно з графіком, помітне зростання загального коефіцієнта корисної дії (ККД) системи. При використанні оптимізованого регулятора енергоефективність системи зростає у межах 0,5–1% порівняно з системою без такого регулятора. Додатково встановлено, що вагова константа в алгоритмі управління впливає на значення ККД: зростання коефіцієнта k_T від 1 до 6 забезпечує приріст ККД приблизно на 0,1%.

- Компроміс між точністю та енергоспоживанням. У результаті збільшення вагової константи, що визначає пріоритет оптимізації ККД, знижується швидкість обертання двигуна. Це спричиняє відхилення від заданого рівня тиску, тобто похибка по тиску збільшується - наприклад, з 4,7 м до 5,6 м при зростанні k_T з 1 до 10. Отже, спостерігається класичний ефект компромісу між точністю відтворення тиску та енергоефективністю системи [22].

- Гнучкість та адаптивність оптимального регулятора. В незалежності від умов експлуатації, застосований регулятор демонструє здатність підтримувати роботу насоса у діапазоні максимального ККД для поточної робочої точки. Якщо основним критерієм виступає мінімізація енергоспоживання, то збільшення вагової константи забезпечить це, хоч і зі зменшенням точності по напору. Якщо ж ключовим є забезпечення стабільного тиску, то навпаки, вагова константа має бути меншою, навіть попри певне зменшення ККД.

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В іншому досліді моделювання проводилося при плавному (неперервному) опорі, що більше відповідає реальним умовам експлуатації насосних установок. Тривалість моделювання становила $t = 100$ с, що дало можливість простежити перехідні та усталені режими в динаміці [23].

Варіації гідравлічного опору у цьому досліді мали менший діапазон, ніж у попередньому: від максимального значення $a_{\max} = 180560$ год²/м⁵ до мінімального $a_{\min} = 100510$ год²/м⁵. Таке плавне коливання дозволило оцінити, як система реагує на дрібномасштабні зміни у гідродинамічному навантаженні.

Результати підтвердили, що навіть за умов м'якої зміни навантаження оптимізована система здатна адаптуватися, зберігаючи баланс між стабільністю тиску та економічністю споживання енергії. Це свідчить про високу чутливість, що є критично важливим для промислових систем водопостачання з динамічно змінними параметрами.

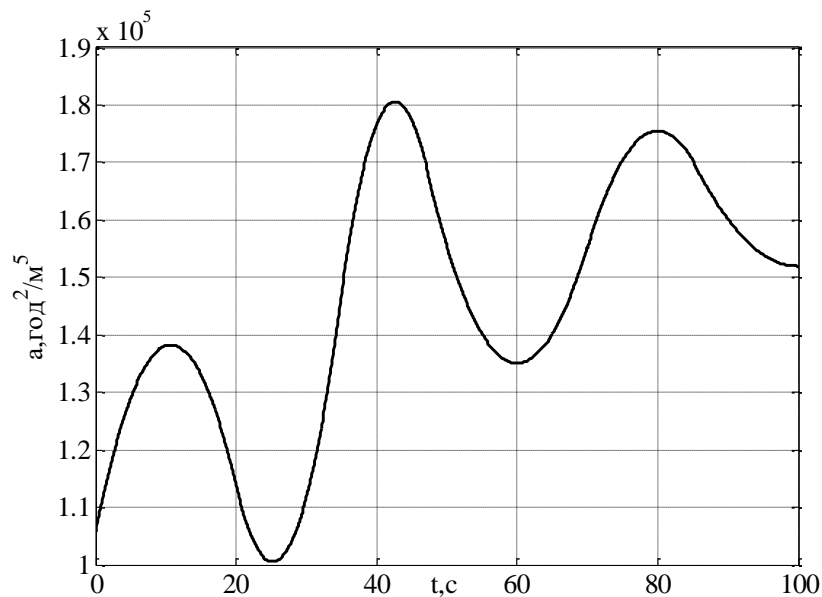
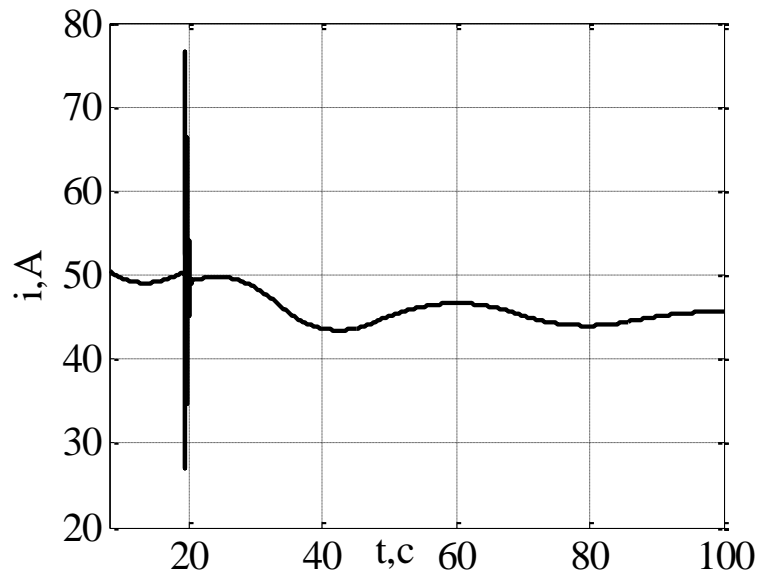
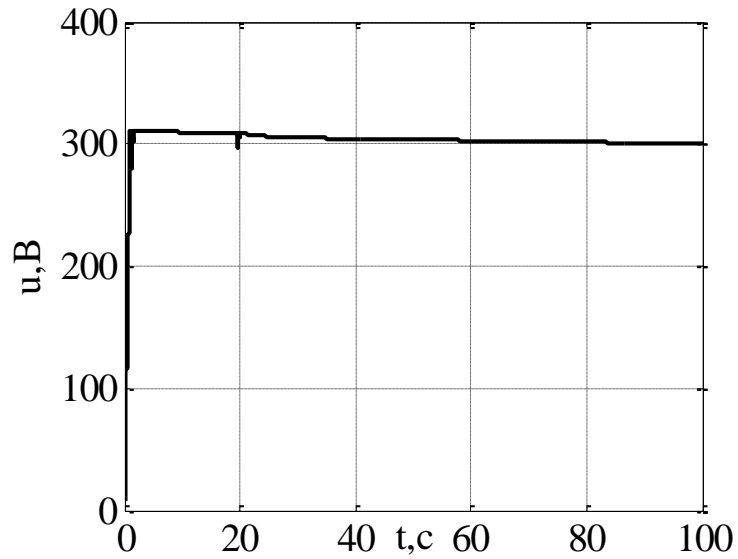


Рисунок 3.7 – Графік зміни гідравлічного опору

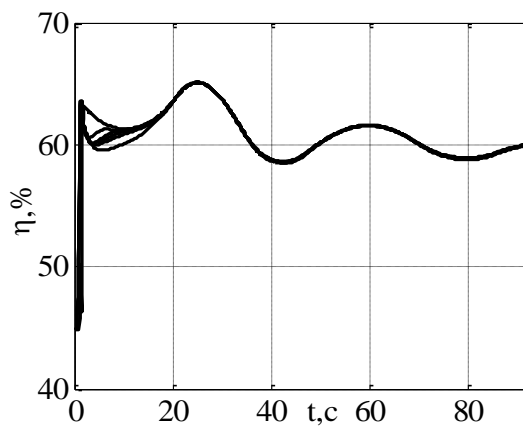


а)

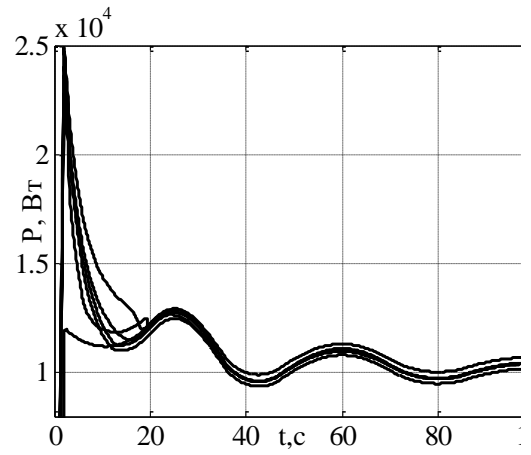


б)

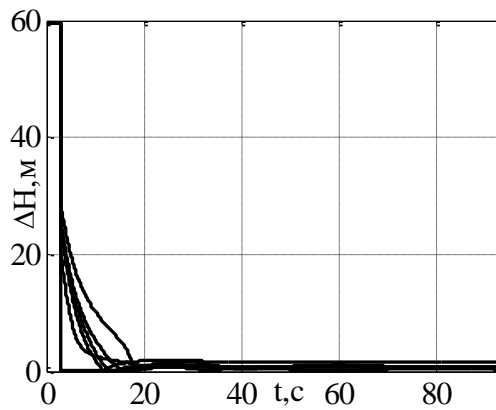
Рисунок 3.8 – Перехідні процеси: а) – значення струму статора; б) – значення напруги статора



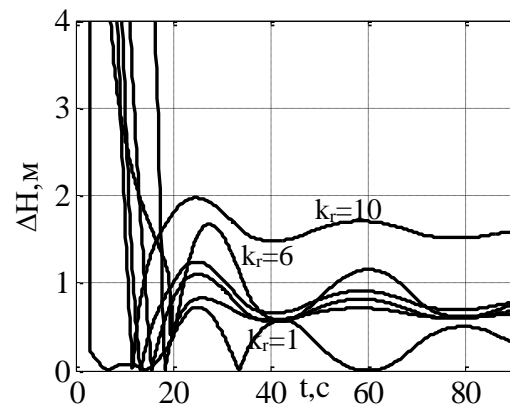
а)



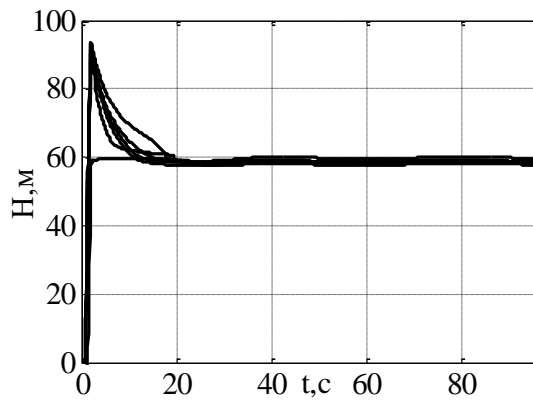
б)



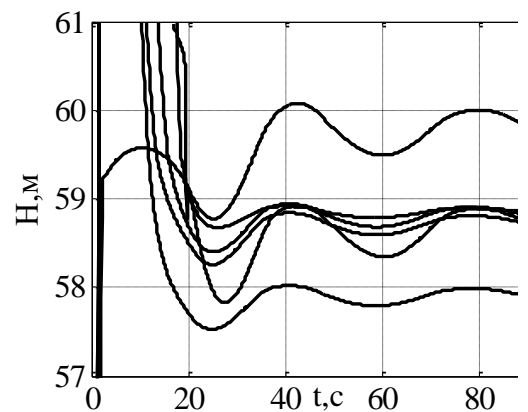
в)



г)



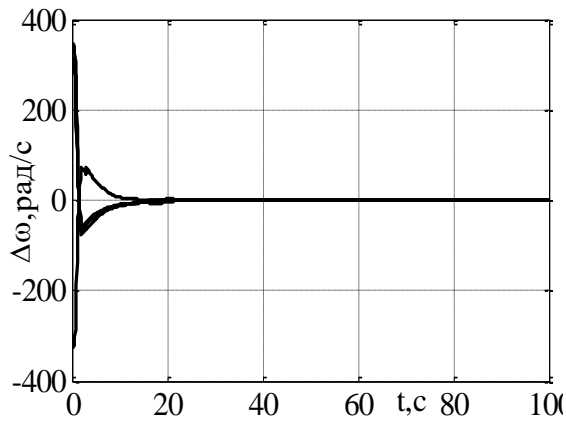
д)



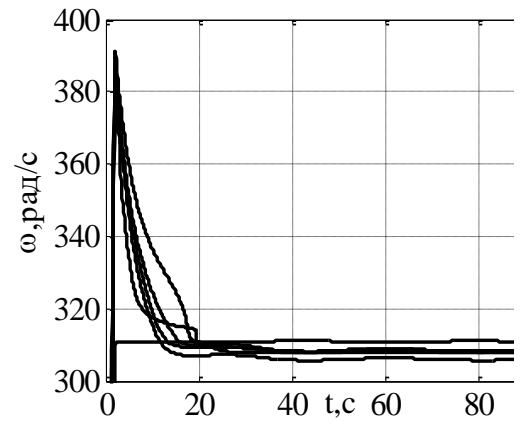
е)

Рисунок 3.9 – Результати моделювання: а) –ККД насосу; б) –потужність насосу; в,г) – похибка по тиску; д,е) –тиск насосу

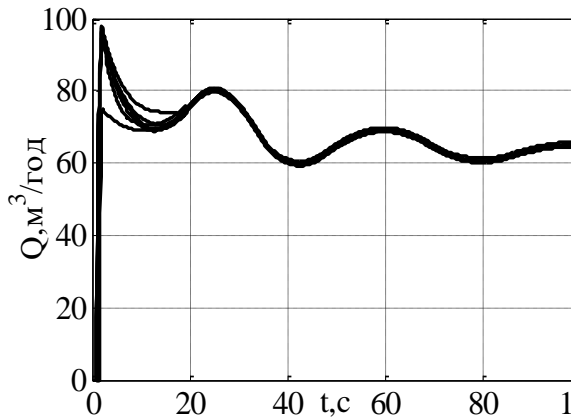
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



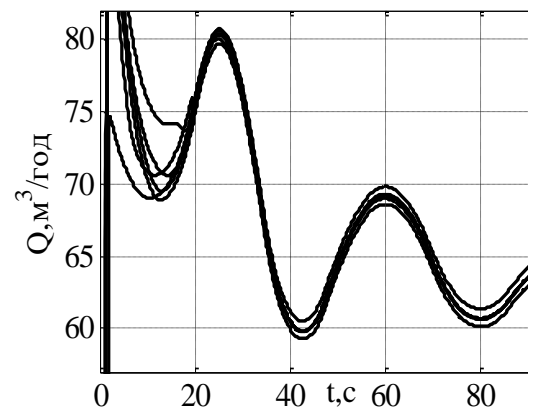
а)



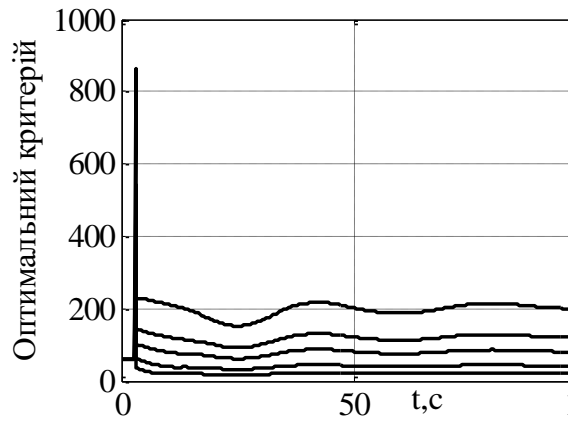
б)



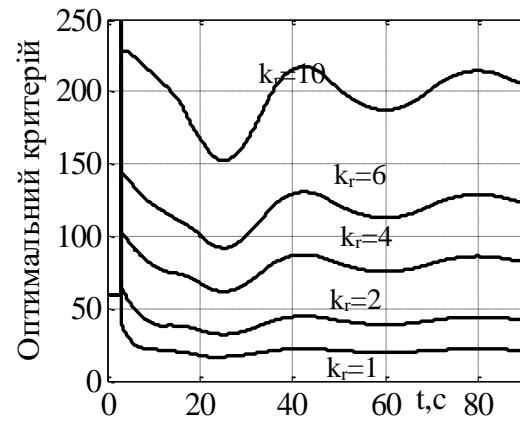
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.10 – Результати моделювання: а) – похибка по швидкості; б) – швидкість насосу; в,г) – продуктивність насосу; д,е) – оцінка сумарної похибки

У порівнянні з першим експериментом, другий дослід виявився більш інформативним і репрезентативним. Це пояснюється тим, що під час його проведення вдалося охопити ширший спектр робочих точок насосної установки, що дозволило глибше дослідити динамічну поведінку системи в умовах плавної зміни гідравлічного опору мережі. Незважаючи на розширення діапазону дослідження, загальні висновки залишилися подібними до попередніх, що підтверджує стабільність та узагальненість результатів [21].

З аналізу графіків видно, що похибка за швидкістю обертання привідного двигуна прагне до нуля, що свідчить про реакцію регулятора. Цей факт підтверджує надійність та ефективність реалізованого алгоритму керування, а також його здатність адаптуватися до варіацій параметрів гідросистеми без втрати точності.

Дослідження також показало, що збільшення вагової константи у структурі оптимізаційного регулятора з $kr = 1$ до $kr = 10$ впливає на значення оптимального критерію (див. рис. 4д, 4е): зі зростанням коефіцієнта збільшується й оцінка критерію оптимальності, що означає перехід до енергетично вигіднішої точки роботи насоса [22].

Разом із цим, ефективність системи, яка вимірюється коефіцієнтом корисної дії, також демонструє незначне зростання. Так, при максимальному значенні вагового коефіцієнта $kr = 10$, приріст ККД становить близько 0,009 (або 0,9%), що підтверджує позитивний ефект енергетичної оптимізації (див. рис. 3а).

Однак, як і в попередньому досліді, таке покращення енергетичних показників супроводжується погіршенням точності підтримання технологічного параметра – тиску. При $kr = 10$, похибка по напору в системі збільшується на приблизно 1 метр у порівнянні з режимом роботи при $kr = 1$. Такий компроміс між точністю і енергоефективністю є типовим для подібних систем, і його врахування є важливим для насосних установок [23].

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

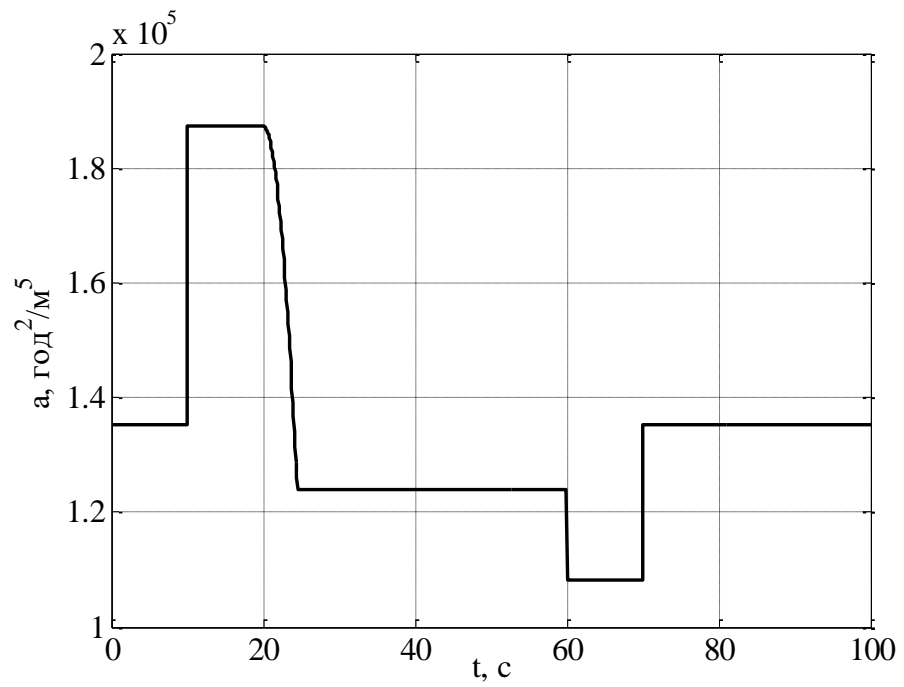
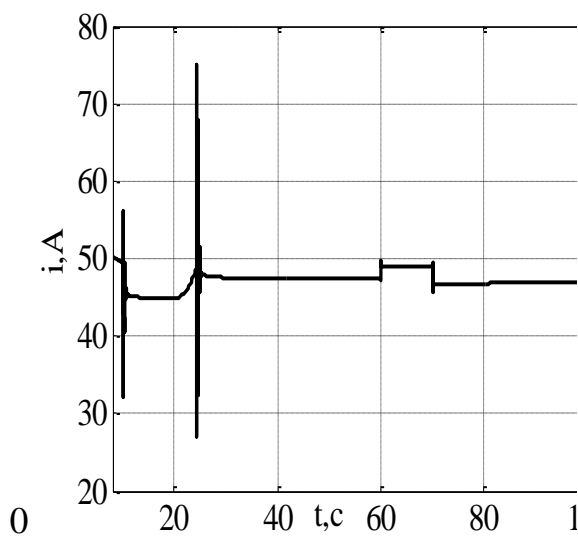
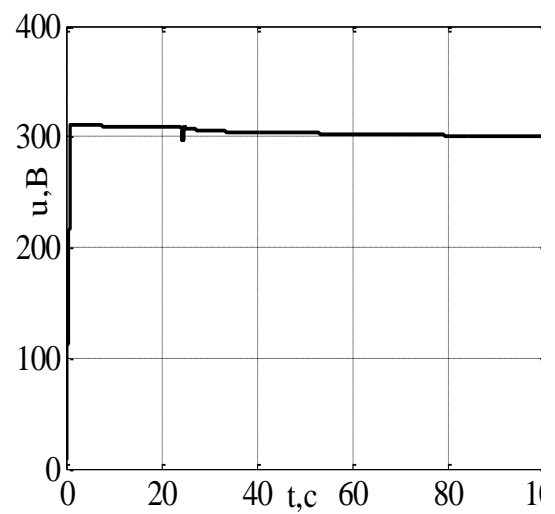


Рисунок 3.11 – Графік зміни гідравлічного опору

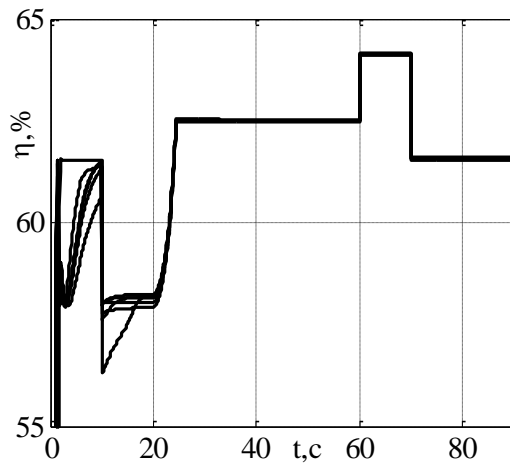


а)

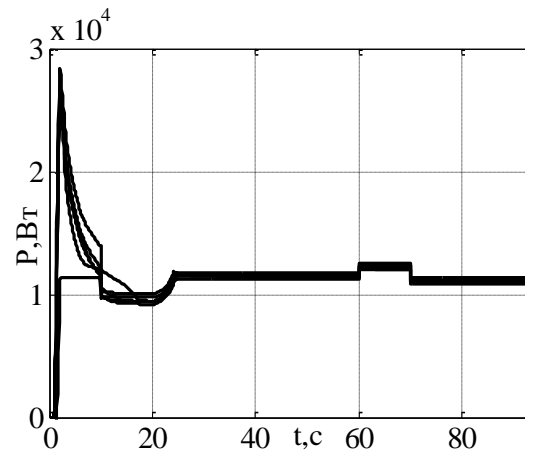


б)

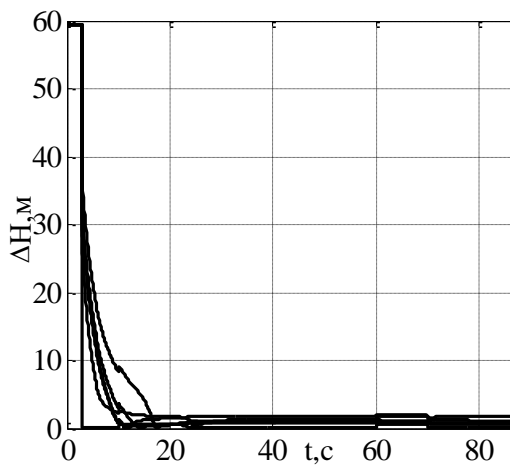
Рисунок 3.12 – Перехідні процеси: а) – значення струму статора; б) – значення напруги статора



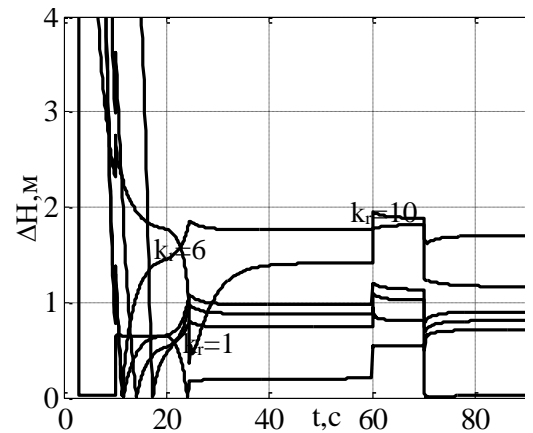
а)



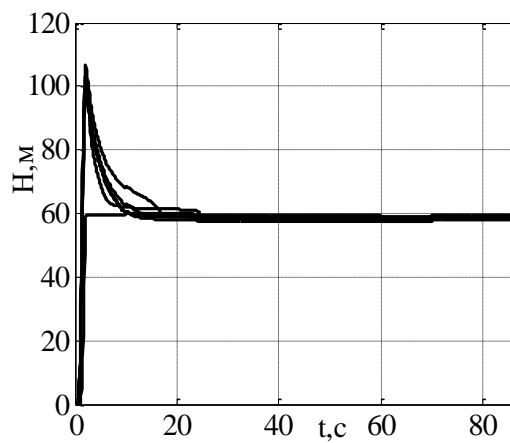
б)



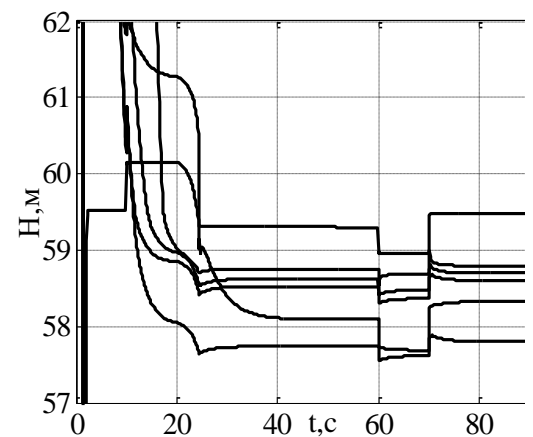
в)



г)



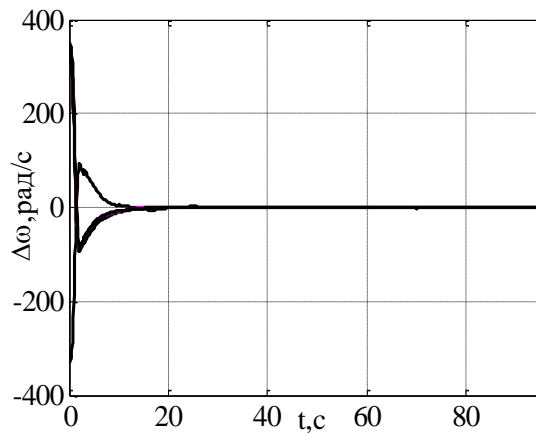
д)



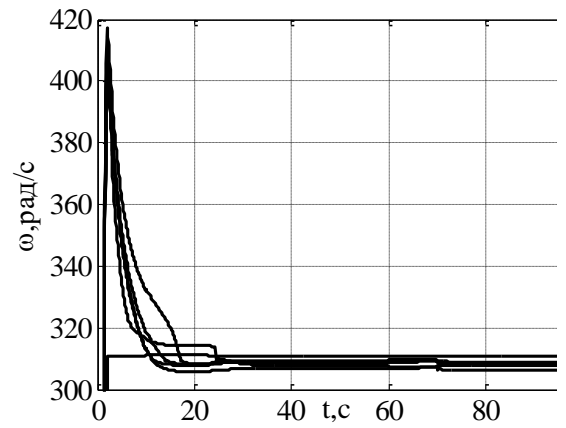
е)

Рисунок 3.13 – Результати моделювання: а) –ККД насосу; б) – потужність насосу; в,г) – похибка по тиску; д,е) –тиску насосу

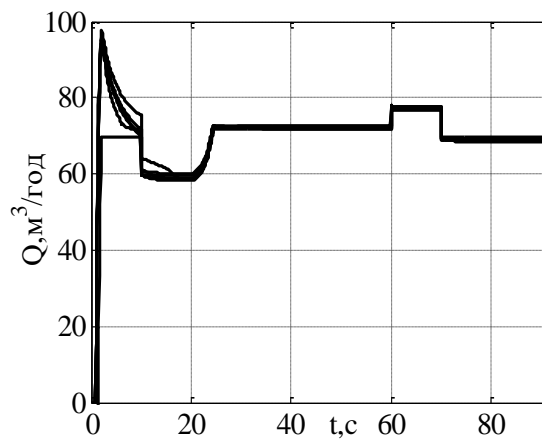
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



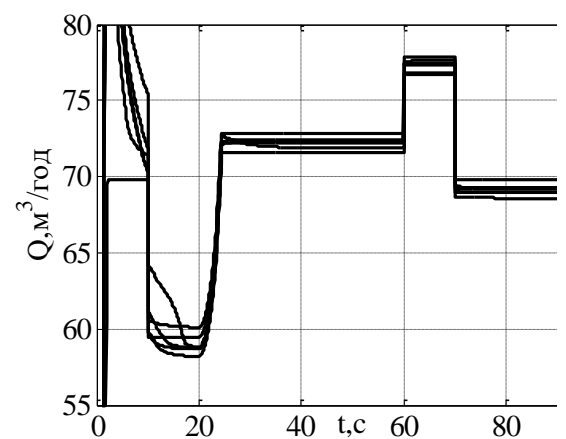
а)



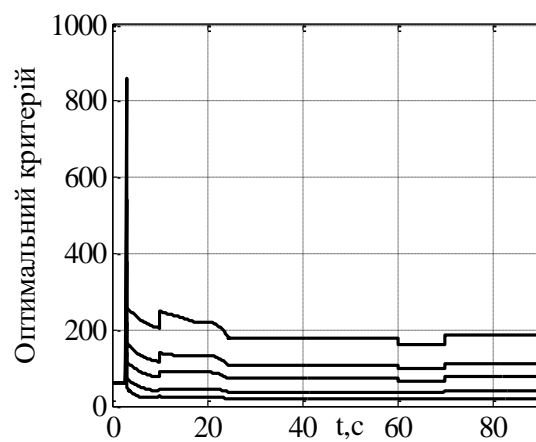
б)



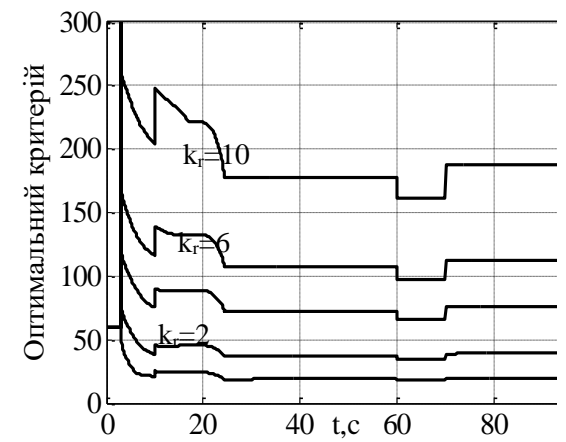
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.14 – Результати моделювання: а) – похибка по швидкості; б) – швидкість насосу; в,г) – продуктивність насосу; д,е) – оцінка сумарної похибки

Умови третього експериментального моделювання дозволили виявити, що розроблена система керування насосною установкою демонструє стійку

працездатність навіть за динамічно змінюваних режимів роботи, максимально наближених до реальних умов експлуатації у складних гідравлічних мережах. Це є свідченням високого рівня адаптивності оптимізованого регулятора та здатності системи зберігати стабільність керування в умовах варіативних навантажень і технологічних змін [24].

У процесі дослідження було встановлено, що при зростанні вагового коефіцієнта в алгоритмі оптимізації енерговитрат (від $kg = 1$ до $kg = 10$), рівень відхилення фактичного тиску від заданого значення лишається в межах 1 метра. Такий результат підтверджує ефективність балансування між технологічними параметрами (такими як тиск) та енергетичними показниками (ККД), що особливо важливо для безперервної роботи насосних агрегатів у міських системах водопостачання чи на об'єктах промислової інфраструктури [25].

Крім того, було зафіксовано, що при зростанні значення вагової константи, енергетична ефективність підвищується, зокрема коефіцієнт корисної дії збільшується на 0,08%, що є вагомим досягненням для енергомістких систем. Це демонструє, що регулятор здатний зменшувати енергоспоживання шляхом інтелектуального вибору оптимальної швидкості обертання електропривода насоса в кожному конкретному режимі роботи.

Таким чином, результати третього етапу моделювання підтверджують, що система керування забезпечує не лише виконання умов сталого тиску, а й дозволяє зміщувати робочу точку насоса в напрямку максимальної ефективності енергоспоживання. Завдяки цьому досягається комплексне підвищення ефективності функціонування водопровідної системи, що є особливо важливим в умовах енергетичної кризи та потреби в ресурсозбереженні [26].

Для забезпечення кількісного аналізу ефективності застосування інтегрованого оптимального регулятора у складі систем автоматичного керування насосними установками, була розроблена відповідна математична модель. Ця модель реалізована у програмному середовищі MATLAB/Simulink, яке широко

					ЕМКС 028008 000 ПЗ	Арк.
						48
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовується для моделювання, аналізу та верифікації складних технічних систем з великою кількістю взаємозв'язаних динамічних процесів.

Побудована структурна схема дозволяє виконувати імітаційне дослідження поведінки насосної установки під впливом змінних керуючих сигналів, враховуючи основні динамічні характеристики системи. У моделі змодельовано варіативність навантаження та гідравлічного опору, що дозволяє дослідити поведінку об'єкта в умовах, які наближені до реальних сценаріїв експлуатації у системах водопостачання. Аналіз моделі охоплює основні технічні показники, зокрема зміни коефіцієнта корисної дії (ККД), динаміку стабілізації тиску та рівень споживаної електроенергії [27].

Функціональна структура моделі включає ключові компоненти: асинхронний електродвигун з частотним перетворювачем, гідравлічний насос, модуль оцінки ККД на основі штучних нейронних мереж, а також блок розрахунку оптимального керуючого сигналу з урахуванням комбінованого критерію ефективності. Впровадження нейромережевого підходу дає змогу адаптивно змінювати керуючі впливи в залежності від поточних умов експлуатації, що значно підвищує гнучкість та точність системи.

Таким чином, розроблена віртуальна модель у Simulink виконує функції інструментального середовища для оцінювання працездатності алгоритмів керування насосними агрегатами при змінних умовах гідравлічного навантаження. Вона дозволяє проводити порівняння між традиційними ПІ-регуляторами та новітніми інтелектуальними системами оптимального керування, що забезпечує можливість ухвалення зважених рішень щодо їх подальшого впровадження у промислову експлуатацію.

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

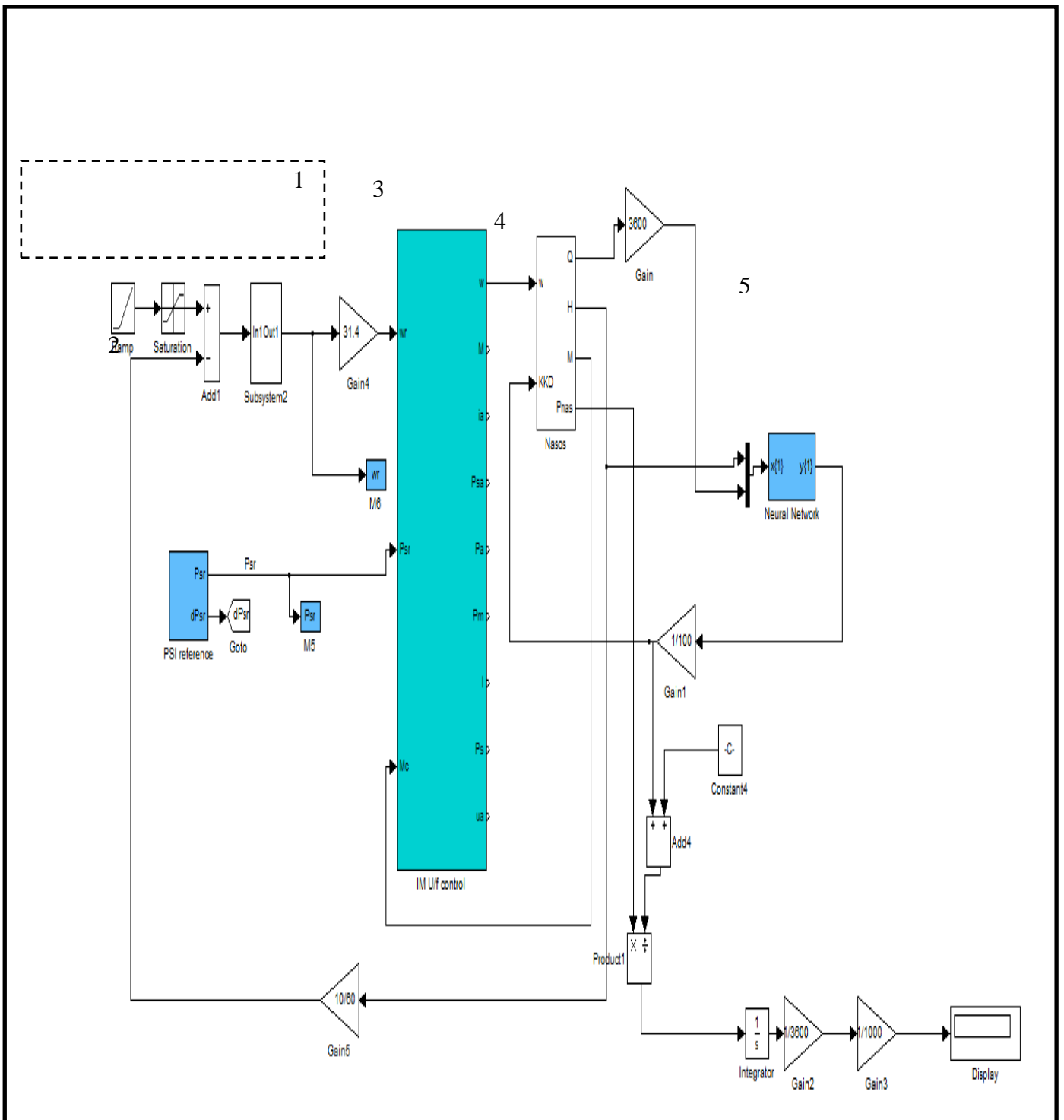
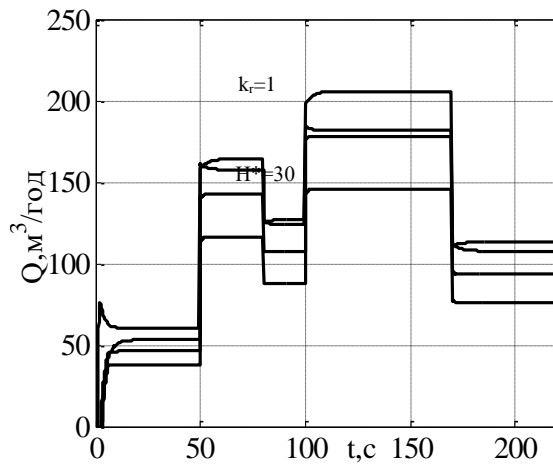
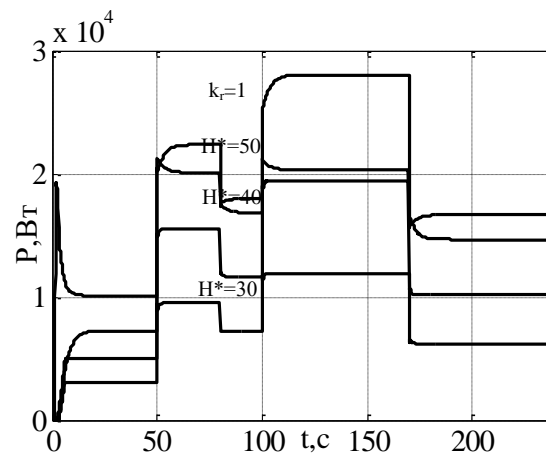


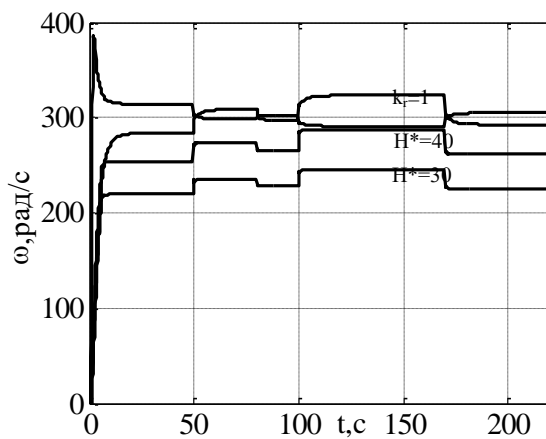
Рисунок 3.15 – Simulink модель



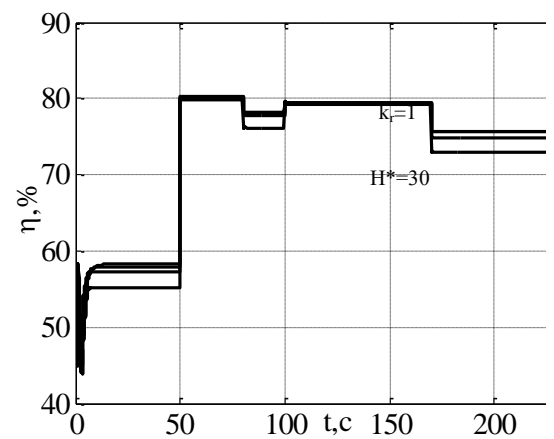
а)



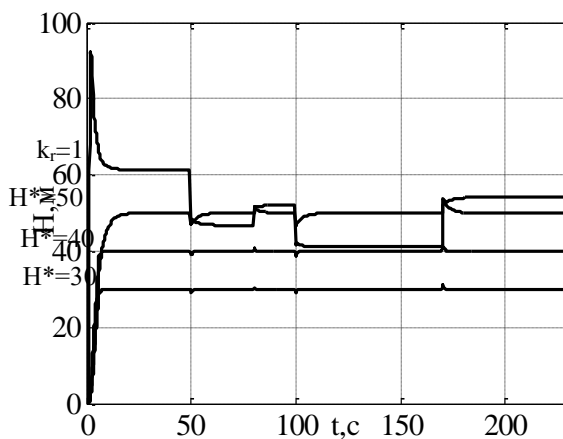
б)



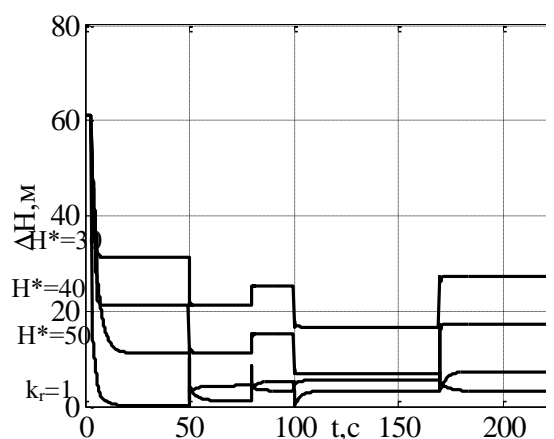
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.16 – Результати моделювання: а) –продуктивність насосу; б) –потужність насосу; в) –швидкість насосу г) –ККД насосу; д) - тиск насосу е) – похибка по тиску

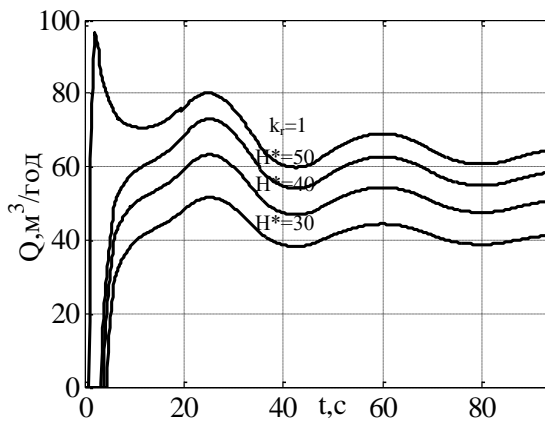
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У результаті проведеного експериментального моделювання було встановлено, що застосування оптимізованого регулятора в системі керування насосною установкою значно підвищує її енергоефективність. На всьому часовому проміжку функціонування системи фіксується поступове й стабільне зростання коефіцієнта корисної дії (ККД). Середній приріст ККД становить близько 3%, що свідчить про покращення енергетичних характеристик приводу. Варто зазначити, що приріст ККД не спостерігається лише у випадках, коли робочий режим насоса уже відповідає точці максимальної ефективності, тобто знаходиться у зоні найвищого ККД згідно його паспортної характеристики [24].

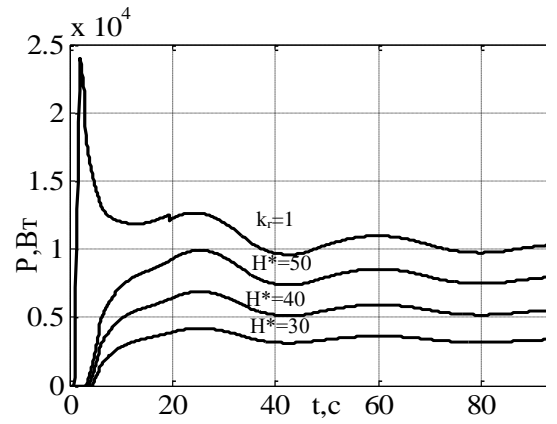
На відміну від запропонованої оптимізованої системи, традиційне регулювання, що ґрунтується на стабілізації напору у визначеній точці мережі, не враховує динаміку зміни навантаження або адаптацію до змін у гідравлічному контурі. В результаті таке регулювання не здатне забезпечити стабільну роботу установки в умовах змінних параметрів споживання води чи змін у характеристиках трубопроводів. Це призводить до виникнення значних коливань тиску, які мають хаотичний характер і не піддаються ефективному контролю [25].

Особливо виразно це спостерігається при відхиленнях між заданим тиском та фактичним значенням, що формується на виході насоса. Відсутність адаптивного регулювання в класичній системі зумовлює нерівномірність реакції приводу, а отже, і нестабільність напору в системі.

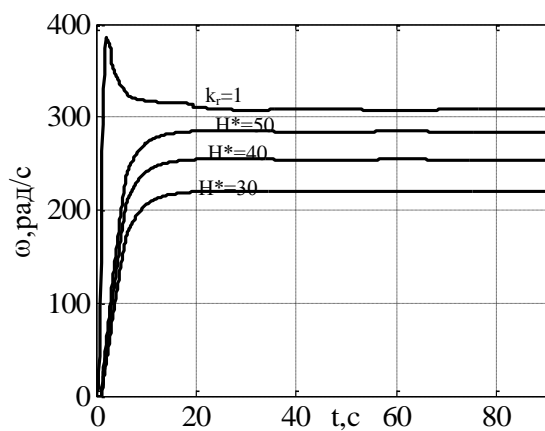
					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						52
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



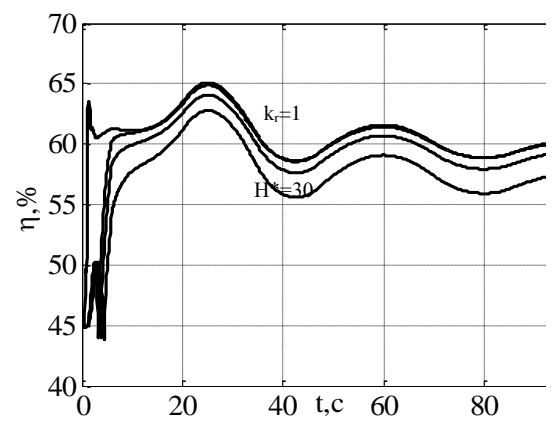
а)



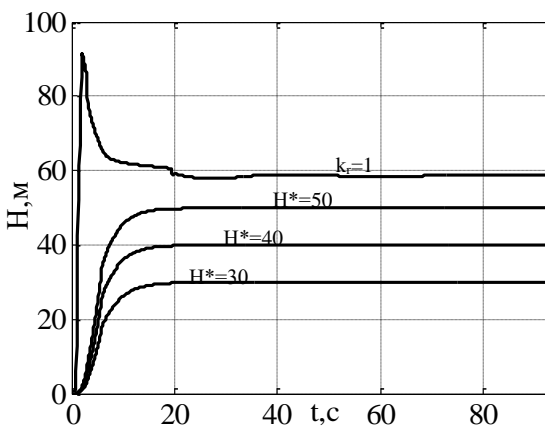
б)



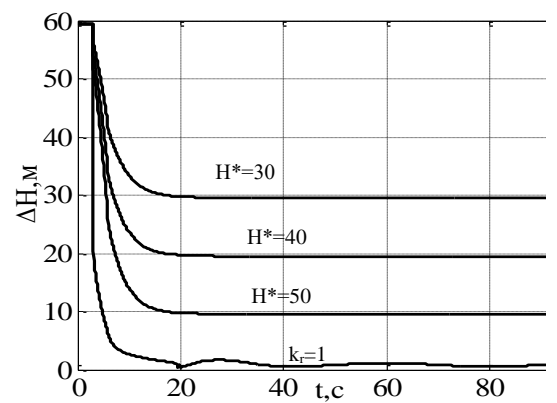
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.17 – Результати моделювання: а) –продуктивність насосу; б) –потужність насосу; в) –швидкість насосу г) –ККД насосу; д) - тиск насосу е) – похибка по тиску

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

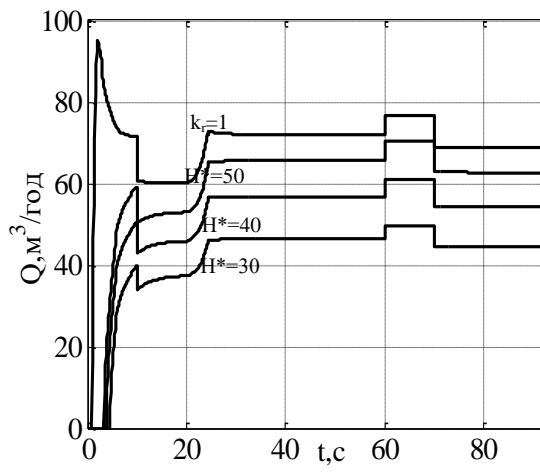
У процесі проведення другого етапу моделювання, у якому змінювались значення цільового тиску в межах обмеженого діапазону, було зафіксовано суттєве покращення стабільності функціонування системи. В умовах використання класичної схеми керування, яка динаміці гідросистеми, похибка між бажаним та фактичним тиском у системі залишалася значною. Так, при завданні тиску $H^*=30H^* = 30H^*=30$ метрів, середнє відхилення становило близько 30 м, при $H^*=40H^* = 50H^*=50$ м — 10 м. Такі показники свідчать про обмежену здатність традиційної системи реагувати на динамічні зміни робочих умов або внутрішні втрати [27].

Протилежну картину продемонструвала вдосконалена система автоматичного регулювання, побудована із використанням інтелектуального алгоритму оптимізації. Застосування такої системи дозволило суттєво зменшити амплітуду похибки підтримання тиску до рівня, що не перевищує 1 м, а варіації фактичного значення напору утримуються в межах $\pm 5\%$ відносно заданого значення. Така динамічна точність досягається завдяки використанню адаптивного регулятора, який у режимі реального часу враховує зміну гідравлічного опору та перераховує необхідну швидкість показнику оптимальності [28].

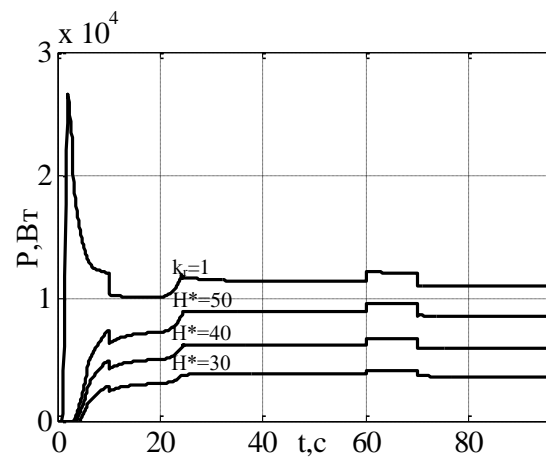
У контексті енергоспоживання, система, обладнана оптимальним регулятором, також виявила себе як ефективніший варіант. Її коефіцієнт корисної дії (ККД) у середньому перевищує аналогічний показник традиційної системи на 0,8%, навіть у тих випадках, коли остання працює в умовах максимально вигідного для себе режиму (тобто, коли робоча точка збігається з піковою ефективністю насоса при $H^*=50H^* = 50H^*=50$ м).

Загалом, результати другого моделювання однозначно демонструють перевагу стратегії керування не лише у забезпеченні стійкості функціонування системи при змінних режимах, а й у плані зменшення втрат енергії при одночасному збереженні або навіть підвищенні точності регулювання основного технологічного параметра - тиску на виході насосної установки [28].

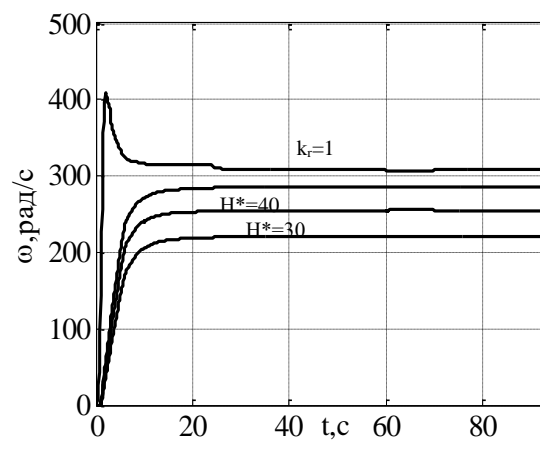
					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



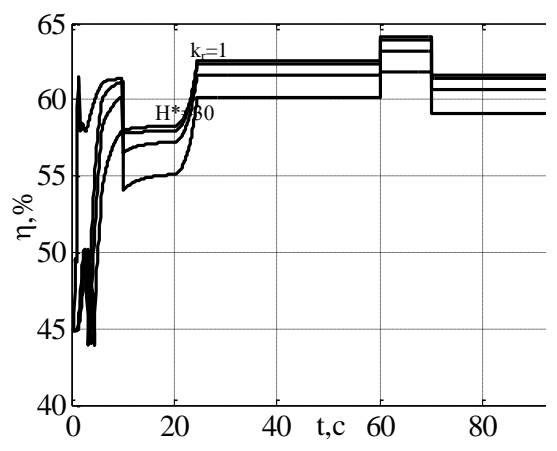
а)



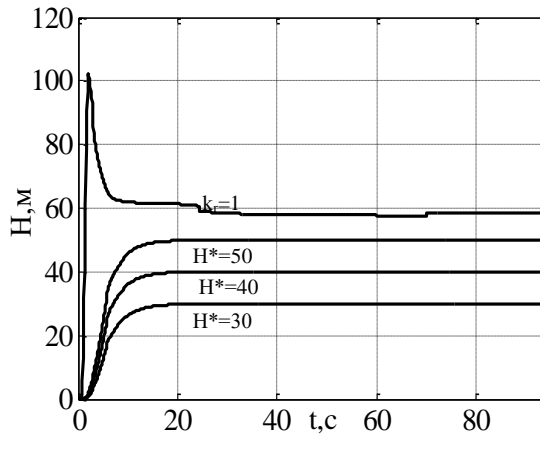
б)



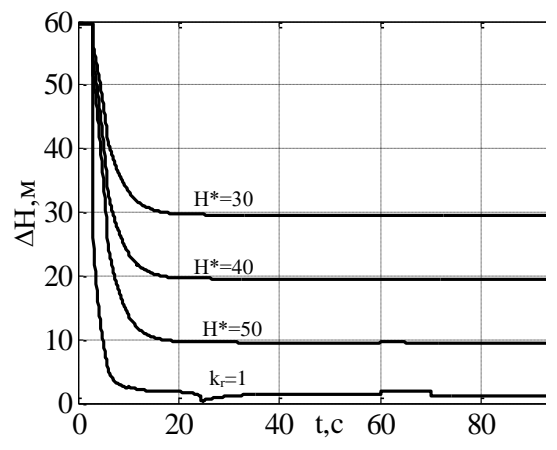
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.18 – Результати моделювання: а) –продуктивність насосу; б) –потужність насосу; в) –швидкість насосу г) –ККД насосу; д) - тиск насосу е) – похибка по

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У ході проведення комп'ютерного моделювання та всебічного функціонального аналізу було здійснено оцінювання роботи модернізованої автоматизованої системи керування насосною установкою. Особливу увагу приділено дослідженню її реакції на різні варіанти зміни гідравлічного опору в трубопровідній мережі. Розглядалися три принципово відмінні сценарії: різкий (ступінчастий), плавний (градієнтний) та змішаний (комбінований), що відтворюють реальні технічні умови експлуатації. Такий підхід дозволив оцінити адаптивність системи до коливань навантаження в гідросистемі та її здатність до автоматичного підстроювання [27].

Особливе місце в дослідженні займала оцінка впливу параметра оптимізації — вагової константи krk_rkr , яка визначає відносну важливість між енергоспоживанням і точністю регулювання тиску в трубопроводі. Для аналізу було обрано значення $krk_rkr = 1, 2, 4, 6, 10$, а також розглянуто випадок, коли регулювання повністю відсутнє (система з відкритим контуром). Це дало змогу проаналізувати поведінку системи при різному пріоритеті енергозбереження відносно точності підтримки технологічного параметра [29].

Отримані результати чисельного експерименту підтвердили, що впровадження адаптивного оптимального регулятора сприяє суттєвому скороченню енерговитрат насосної установки, при чому середнє зниження споживаної потужності становило близько 5,38%. Це є особливо актуальним для об'єктів із тривалим режимом роботи, де навіть незначне підвищення ККД веде до значної економії енергоресурсів протягом експлуатаційного циклу.

Паралельно проведено детальний порівняльний аналіз ефективності оптимізованої системи та класичної схеми стабілізації тиску, що реалізує постійне значення напору незалежно від навантаження. Було змодельовано ситуації для трьох значень цільового напору: 30, 40 та 50 метрів. Аналіз графіків перехідних процесів та числових даних доводить, що оптимізована система забезпечує значно точніше дотримання заданих значень тиску, змінюючи частоту обертання

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електродвигуна залежно від змін у гідравлічному контурі, що забезпечує стабільну роботу навіть в умовах нестабільного навантаження.

Узагальнюючи, варто зазначити, що розроблена система керування на основі адаптивного регулятора з інтелектуальними властивостями не лише покращує точність підтримання основного керованого параметра, але й демонструє стале підвищення енергоефективності системи насосного типу на 0,7–1% у порівнянні зі звичайним ПІ-регулюванням. Це дає підстави рекомендувати її до впровадження у сучасні комплекси водопостачання та подібні інженерні системи, де енергозбереження та стабільність параметрів мають ключове значення для безперервного функціонування.

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

У межах виконання роботи було розглянуто підходи до аналізу режимів функціонування електромеханічних систем з регульованим асинхронним електроприводом, що працює в умовах частотного керування. Об'єктом дослідження виступала система автоматизації з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором, для якої було запропоновано підхід до підвищення енергоефективності за рахунок впровадження алгоритмів керування. Наукова задача підвищення ефективності функціонування частотно-керованих електроприводів для промислових технологічних систем була успішно вирішена. Основні результати, отримані в ході дослідження, можна узагальнити таким чином:

Аналіз методів енергоефективного керування. Проведено всебічний огляд та систематизацію сучасних методологій автоматичного регулювання швидкості електроприводів, орієнтованих на мінімізацію енергоспоживання. Особливу увагу зосереджено на методах оптимізації роботи установок у змінних умовах навантаження. Це дало змогу сформулювати обґрунтовану мету дослідження та конкретизувати його задачі.

Побудова математичних моделей. Розроблено уточнені математичні описи електромеханічної системи із частотно-регульованим асинхронним двигуном. Моделі включають врахування нелінійних та динамічних характеристик системи, дозволяють досліджувати поведінку приводу під дією різноманітних збурень.

Для підвищення точності математичного моделювання використано нейромережеві підходи. Проведений аналіз показав, що при розширенні обсягу тренувального набору даних точність відтворення поведінки системи суттєво зростає, що підтверджує доцільність використання методів штучного інтелекту для моделювання складних електромеханічних систем.

На основі сформульованих енергетичних і технологічних вимог до функціонування системи регулювання розроблено алгоритм оптимального

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
						58
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

керування, що забезпечує компроміс між точністю стабілізації заданих параметрів і зменшенням споживання енергії.

Експериментальне дослідження системи. Проведено серію моделювань для електромеханічної системи з впровадженим оптимальним регулятором за різних сценаріїв зміни гідравлічного опору, що імітують реальні режими роботи. Результати експериментів показали, що в середньому енергоспоживання зменшується на 5,83% при забезпеченні прийнятної точності керування, навіть у випадках значних варіацій навантаження.

Порівняльний аналіз систем керування. В ході досліджень проведено зіставлення результатів функціонування запропонованої системи з класичною схемою стабілізації тиску. Встановлено переваги запропонованого підходу в частині адаптивності, стабільності роботи при змінних режимах і підвищення ККД установки.

					<i>ЕМКС 028008 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59