

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**В. В. Грабко, М. М. Мошноріз**

**МЕТОД ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ  
РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ  
НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ  
ВОДОПОСТАЧАННЯ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 62-531.3: 62-83

ББК 31.291

Г75

Рецензенти:

**А. О. Лозинський**, доктор технічних наук, професор

**В. М. Кутін**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 8 від 31 березня 2011 р.)

**Грабко, В. В.**

Г75      Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.

ISBN 978-966-641-425-3

В монографії здійснено огляд та аналіз існуючих підходів та засобів забезпечення насосною станцією потреб споживача у воді. Описано розроблений авторами новий метод визначення законів керування електроприводами насосів, при якому забезпечується зменшення споживання енергії та враховуються обмеження на прямий пуск. Описано синтезовані структури пристроїв керування.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників та працівників комунального господарства, що займаються експлуатацією електричних приводів насосів, а також може бути корисною студентам та аспірантам ВНЗ.

**УДК 62-531.3: 62-83**

**ББК 31.291**

**ISBN 978-966-641-425-3**

© В. Грабко, М. Мошноріз, 2011

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ВИМОГ ДО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСІВ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ.....	8
1.1. Насосна станція другого підйому. Особливості роботи.....	8
1.2. Регулювання продуктивності групи насосних агрегатів, що працюють паралельно.....	13
1.3. Аналіз методів та засобів для забезпечення ефективної роботи насосного агрегата.....	15
1.4. Вимоги до експлуатації електричних двигунів, які використовують для приводу насосів .....	23
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ.....	28
2.1. Визначення оптимального способу регулювання продуктивності насосної станції водопостачання .....	28
2.2. Визначення комбінацій ввімкнених двигунів насосних агрегатів.....	40
2.3. Визначення законів керування електричними двигунами насосних агрегатів при забезпеченні точного значення продуктивності.....	50
2.4. Визначення моментів ввімкнення чи вимкнення двигунів нерегульованих насосних агрегатів.....	57
2.5. Розробка методу оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання .....	61
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ НА МЕРЕЖУ СПОЖИВАЧА .....	64
3.1. Модель відцентрового насоса.....	64
3.2. Модель системи перетворювач частоти–асинхронний двигун .....	67
3.3. Модель регульованого насосного агрегата .....	71
3.4. Модель паралельної роботи насосів різних типів.....	73
3.5. Модель паралельної роботи насосних агрегатів на мережу споживача .....	76

3.6. Перевірка розробленого методу на комп'ютерній моделі системи водопостачання .....	80
<b>РОЗДІЛ 4. ЗАСОБИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ .....</b>	<b>84</b>
4.1. Пристрій керування запуском двигуна насосного агрегата .....	84
4.2. Мікропроцесорна реалізація пристрою керування запуском двигуна насосного агрегата .....	105
4.3. Пристрій керування регульованим насосним агрегатом .....	107
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>111</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>113</b>
Додаток А. Вибір двигуна та насоса .....	124
Додаток Б. Параметри оптимізації кількості працюючих насосів .....	126
Додаток В. Розрахунок параметрів оптимізації .....	128
Додаток Д. Розрахунок постійних часу насосів .....	132
Додаток Е. Модель асинхронного двигуна в ортогональній системі координат відносно поточкозчеплень .....	135

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД	Асинхронний двигун
АІ	Автономний інвертор
ВН	Відцентровий насос
ЕЕ	Електрична енергія
ЕМСАК	Електромеханічна система автоматичного керування
ЕОМ	Електронна обчислювальна машина
ЕП	Електричний привід
ЗЗ	Зворотний зв'язок
КВ	Керований випрямляч
ККД	Коефіцієнт корисної дії
МВ	Мережа водопостачання
НА	Насосний агрегат
НС	Насосна станція
ППП	Пакет прикладних програм
ПЧ	Перетворювач частоти
СЧК	Система частотного керування
ФП	Функціональний перетворювач

## ВСТУП

Останнім часом, у зв'язку зі збільшенням вартості енергоресурсів все помітнішою стає тенденція до зростання цін на електроенергію [1, 2]. Ця обставина, а також висока енергоємність насосного обладнання (близько п'ятої частини енергії, яка виробляється в країні [2; 3, с. 54]) спонукають до пошуку нових методів та способів зменшення споживання електричної енергії електроприводами насосів при забезпеченні потреб споживача у воді [4]. Однією з сфер використання насосних агрегатів з приводом від двигунів середньої та великої потужності є системи водопостачання населених пунктів.

Подача води насосною станцією повинна відповідати потребам споживача, які змінюються протягом доби. Тому її продуктивність потрібно регулювати. Будь-яке відхилення продуктивності насосного агрегата від номінального значення призводить до додаткових витрат енергії. За таких умов великого значення надають оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання.

Для регулювання продуктивності насосної станції часто вдаються до зміни кількості працюючих насосних агрегатів, двигуни яких запускаються безпосередньо з електричної мережі. На двигуни середньої та великої потужностей накладаються технічні обмеження до прямого пуску, які доповнюються ще необхідністю витримки паузи між пусками. Тому при забезпеченні потрібного значення продуктивності насосної станції дуже важливим є врахування особливостей пуску двигунів насосів.

Найефективнішим способом отримання потрібного об'єму подачі води в мережу є використання регульованого електроприводу. Він, у порівнянні зі зміною гідравлічних параметрів трубопроводу чи насоса, дає можливість розширити діапазон регулювання продуктивності насосного агрегата за суттєвого зменшення споживання його двигуном електричної енергії. Не дивлячись на порівняно високу вартість перетворювального обладнання, його термін окупності незначний і може становити декілька місяців. Але насосна станція є багатозв'язною системою, у якій зміна параметрів одного насосного агрегата може вплинути на параметри інших. Тому, застосовуючи регульований привід, потрібно вирішити питання оптимальної сумісної роботи насосів та

доцільності установки перетворювачів на кожен двигун насосного агрегата.

У зв'язку з викладеним, актуальним є питання оптимального, за мінімумом витрат електричної енергії, керування приводами насосних агрегатів станції водопостачання, за якого насоси узгоджено працюють на мережу споживача, забезпечуючи потрібне значення продуктивності та враховуючи обмеження на прямий пуск привідних двигунів. [5;3, с. 148; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12, с. 10; 13].

Питання управління електроприводами насосних агрегатів для забезпечення потрібного значення продуктивності розглядаються у роботах Б. С. Лезнова (Московський технічний університет), А. А. Іскендерова (Азербайджан), М. Г. Поповича (Київський політехнічний інститут), О. І. Кіселичника (Київський політехнічний інститут), Т. В. Коренькової (Кременчуцький державний університет ім. М. Остроградського), К. Г. Гриценка (Донецький національний технічний університет), А. О. Лозинського (НУ «Львівська політехніка»), Р. С. Саїтбаталова (Казанський державний технічний університет), В. Д. Колотило (Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури), Є. М. Зоркія (Москва), М. Ф. Ільїнського (Московський енергетичний інститут), О. К. Аракеляна (Чувашський державний університет Ульянова), Г. Б. Онищенко (Московський державний загальнотехнічний університет), В. С. Бойка (Київ), наукових колективів «Триол», «Приводная техника», «КСК-Автоматизація», «Лівгідромаш», компанії «АДЛ», «ІРЗ», «Електротекст», «Сервотехніка», «Харківський водоканал проект», «Сименс» та ін.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ВИМОГ ДО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСІВ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ

### 1.1. Насосна станція другого підйому. Особливості роботи

Насосна станція (НС) призначена для перекачування рідини з джерела водозабору або резервуару чистої води в мережу водопостачання (МВ). Вода, яка забирається з джерела водозабору, насосами станції першого підйому подається в очисні споруди [14, 15]. Після очистки вода надходить до резервуару чистої води, з якого забирається другою групою насосів, встановлених на НС другого підйому, і по водоводах подається в МВ, яка подає воду до споживачів. Якщо МВ має значну протяжність, то систему водопостачання оснащують НС третього підйому, насоси яких підвищують тиск води у трубопроводах до потрібного значення.

Для досягнення потрібного значення продуктивності НС другого підйому виконується як група насосних агрегатів (НА), що працюють паралельно. Вона подає воду в трубопровідну мережу по двох водоводах. При такому з'єднанні кожен з насосів групи впливає на роботу інших насосів цієї групи [3, 16]. Це призводить до того, що подача, тиск, потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД) кожного з них суттєво залежать від режимів навантаження агрегатів, що працюють сумісно [17, 18].

При однакових насосах підключення другого насоса паралельно першому збільшує подачу установки в 2 рази лише в тому випадку, коли загальний трубопровід системи не створює гідравлічного (або він не значний) опору [3, 16]. Чим більший гідравлічний опір трубопроводу, тим крутіше піднімається його характеристика і тим менше збільшується сумарна подача при ввімкненні другого насоса. Спостерігається і зворотне явище: якщо один із насосів, ввімкнених паралельно, відімкнути, то інші, що залишилися в роботі, самовільно збільшують подачу і потужність. Це пояснюється тим, що при вимкненні одного із насосів подача установки зменшується, гідравлічний опір загального трубопроводу падає, тиск у вузловому перерізі знижується



і насоси, які залишилися в роботі, будуть працювати при зниженому тиску. Але зменшенню тиску при звичайних формах характеристик відповідає збільшення подачі і збільшення потужності.

Відповідно до [19] робочі насоси обладнуються певною кількістю резервних. Останні необхідно випробовувати не рідше одного разу за десять днів. Роботу насосних агрегатів з однаковою робочою характеристикою по можливості постійно чергувати.

Обов'язковим елементом гідравлічної схеми є зворотні клапани, засушки на напірних лініях регульованих насосів, оскільки при роботі на малих частотах обертання можливий зворотний потік рідини [13, с. 127–128]. При виборі типу насосів і визначенні числа робочих агрегатів необхідно враховувати сумісну роботу насосів [3, с. 159; 2].

НС другого підйому працюють за ступінчастим графіком [3, с. 159]. Не завжди можна забезпечити потрібне значення продуктивності станції. Невідповідність цього значення потребам споживача призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) паралельно працюючих агрегатів, що в кінцевому рахунку виливається у додаткові затрати електричної енергії. Якщо споживання води в мережі більше ніж подає її насосна станція, то насоси працюватимуть з низьким ККД [3, с. 159]. Якщо ж витрати в мережі менші, ніж подача насосів, то за рахунок саморегулювання насоси будуть розвивати тиск, більший ніж потрібно в мережі, і, як наслідок, загальний ККД НС буде зменшуватися.

До особливостей роботи насосних станцій слід віднести і те, що обладнання, якими вони оснащуються зазвичай має достатньо великий запас по потужності [20, с. 153]. Тому в трубопровідній мережі виникає надлишок тиску, а НА станції працюють з невисокими значеннями ККД. Крім того, значна протяжність споживача (населений пункт), розподілена трубопровідна мережа та різна висота підйому рідини для споживача зумовлює і нерівномірність розподілу тиску. Внаслідок чого НС вимушена працювати з підвищеним значенням тиску на напірному трубопроводі, що також погіршує ефективність роботи всієї системи водопостачання.

Таким чином, для роботи при номінальних значення тиску, продуктивність НС потрібно регулювати. Існують різні способи зміни продуктивності окремо працюючих насосів і досить обмежена кількість

способів регулювання продуктивності групи насосів, що працюють паралельно.

Сучасний стан розвитку техніки дозволяє в якості способу зміни продуктивності насосної станції використовувати найбільш економічно доцільний – регульований електропривід [13]. Відомо, що застосування останнього може привести до зменшення споживання турбомеханізмами ЕЕ на 25 % [21, с. 1].

Визначаючи число регульованих насосів, слід врахувати, що зменшення швидкості обертання одного з насосів може спричинити перевантаження нерегульованих насосів, вивести робочі точки нерегульованих насосів за межі робочої зони, зменшити ККД і в особливо несприятливих умовах викликати кавітацію. В такому разі регульований електропривід повинен бути встановлений на всіх НА, а зміна частоти обертання насосів, що працюють паралельно, повинна відбуватися одночасно на одне і те ж значення. Синхронна зміна частоти обертання забезпечується керуванням всіх насосів від загальної системи автоматики [13, с. 127].

Застосування регульованого електроприводу, крім економічності та плавності регулювання, дає можливість підвищити продуктивність станції без збільшення виробничих площ за рахунок збільшення одиначної потужності насосних агрегатів, оскільки їх лінійні розміри ростуть значно повільніше ніж потужність та продуктивність [13].

В [13] зазначається, що застосування регульованого електроприводу в системах водопостачання дозволяє зменшити не тільки електроспоживання двигунами насосів, а і покращити умови роботи самої системи. Мається на увазі «виключення непотрібних для комфортного водопостачання надлишків тиску, які виникають в процесі роботи СВ (системи водопостачання) – при зміні витрат, при рості тиску в магістральних гідромережах і т.п.». В джерелі [12, с. 10] зазначається, що для існуючих систем комунального водопостачання кожна зайва атмосфера, за рахунок більш сильних витоків з трубопроводу, призводить до 7–9% втрат води.

При застосуванні регульованого електроприводу найкращі економічні показники забезпечують системи з керованими перетворювачами частоти [22]. «Висока динаміка застосування РЕП і КСК на НС підтверджується аналізом продукції провідних світових виробників на-

сосного обладнання та матеріалів, опублікованих наукових досліджень у цій сфері».

У випадку, коли на НС встановлені регульовані і нерегульовані електроприводи, при керуванні ними необхідно передбачати зміну частоти обертання не лише регульованих НА, а і зміну кількості працюючих нерегульованих агрегатів. При цьому ввімкнення чи вимкнення нерегульованих двигунів повинно відбуватися завчасно, до того як подача регульованого НА зменшиться до нулевого значення, щоб виключити роботу насоса в зоні низьких ККД [13, с. 127].

Сучасний стан в розвитку техніки висуває вимоги до широкого застосування на насосних станціях сучасних систем автоматизації та автоматизації. Конструкція насосної станції повинна передбачати можливість модернізації і розширення, заміни встановленого обладнання на більш потужне, яке забезпечувало б збільшення подач і тисків. Крім того, необхідно врахувати і те, що багато насосних станцій вже відпрацювали свій ресурс безвідмовної роботи і надалі продовжують працювати зі старим обладнанням. Це ставить вимогу перед обслуговуючим персоналом керувати насосним устаткуванням станції з врахуванням напрацьованого ресурсу обладнання, доцільності та глибини регулювання, енергоефективності керування тощо. Слід сказати і те, що існують випадки, коли в паралельній роботі беруть участь насоси з різними характеристиками, що ускладнює керування ними і призводить до завчасного виходу із ладу, частих поломок, невиправданих затрат енергії. Неправильне управління групою насосних агрегатів може призвести до роботи деяких з них поза робочою частиною характеристики з низьким ККД та значним споживанням енергії.

В роботі [23, с. 409–411] вказано на можливість керування групою насосів, що працюють паралельно, електроприводом серії ALTIVAR 58 виробництва Schneider-Electric. Для цього він оснащується додатковою платою. «Саме застосування плати для керування групою насосів дозволяє при допомозі тільки одного перетворювача частоти здійснити автоматичне керування групою до 5 насосів, забезпечуючи при цьому постійний тиск в трубопроводі при зміні витрат» [23, с. 409]. Принцип керування полягає в тому, що є певне значення продуктивності, яке може забезпечити один регульований насосний агрегат. При перевищенні цього значення перетворювач частоти видає сигнал на ввімкнення нерегульованого додаткового насоса. Одночасно з цим

автоматично зменшується частота обертання регульованого насоса. І навпаки, при зменшенні потрібного значення витрат більше за визначене значення, перетворювач частоти видає сигнал на зупинку нерегульованого насоса, а його продуктивність переймає на себе регульований. Вказано також, що вибір регульованого насоса та послідовності ввімкнення нерегульованих відбувається за одним з дев'яти алгоритмів керування насосами плати керування.

Відомі станції керування регульованим електроприводом насосів і вентиляторів «СУ-ЧЕ», призначені для автоматичного та ручного керування групою насосних агрегатів і вентиляторів з асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором.

Основними функціями станції керування є:

Для неавтоматичних станцій:

- підтримка заданого значення тиску на виході групи насосних агрегатів;
- забезпечення можливості підключення кожного з насосів до перетворювача частоти або мережі;
- забезпечення можливості керування перетворювачем частоти від системи, яка здійснює отримання і обробку інформації від об'єкта керування, або самого технологічного процесу та видачу сигналів керування на перетворювач частоти і насосні агрегати;
- перемикання на роботу насосів від мережі при аварії перетворювача частоти;
- забезпечення оперативного керування режимом роботи перетворювача частоти безпосередньо з панелі керування станції;
- можливість запуску і зупинки кожного насоса кнопками в режимі ручного керування прямим пуском від мережі;

Для автоматичних станцій:

- підтримання заданого значення тиску на виході групи насосних агрегатів;
- контроль за роботою насосів і перемикання на резервний насос при аварії робочого;
- перемикання на роботу насосів від мережі при аварії перетворювача частоти;

- автоматичне підключення одного або двох додаткових насосів при недостатній продуктивності робочого (для станцій з кількістю насосів більшою 2);
- автоматичне чергування ввімкнених насосів через задані інтервали часу для забезпечення рівномірного завантаження насосів;
- забезпечення оперативного керування режимом роботи перетворювача частоти безпосередньо з панелі керування станції;
- можливість запуску і зупинки кожного насоса кнопками в режимі ручного керування прямим пуском від мережі;
- видача на диспетчерський пульт сигналів про режими роботи станції.

До обмежень запропонованого пристрою керування групою насосних агрегатів слід віднести неефективність керування НС, оскільки зміна продуктивності одного НА не забезпечує такої ж зміни продуктивності всієї станції. Крім того, чергування роботи нерегульованих НА не забезпечує «рівномірне завантаження насосів».

## **1.2. Регулювання продуктивності групи насосних агрегатів, що працюють паралельно**

Як відомо, фактична подача НС визначається точкою перетину сумарної витратної характеристики насоса з характеристикою мережі. Тому змінити подачу можна або за рахунок зміни характеристики насосів станції або характеристики мережі. Відповідно до [3, с. 54; 24, с. 169; 25, с. 194; 26–30] розрізняють такі способи регулювання:

- зміною кількості робочих машин;
- зміною характеристики мережі водопостачання (дроселювання);
- зміною частоти обертання робочого колеса насоса (частотний спосіб регулювання, використання варіаторів частоти);
- зміною геометрії проточних каналів насоса і кінематики потоку на вході в робоче колесо (байпасування, використання напрямних апаратів).

На практиці часто використовується поєднання кількох способів регулювання подачі [3, с. 54; 31].

В результаті опрацювання джерел [3, с. 54; 4, с. 179–187; 24, с. 169; 29; 30; 32–35], отримано переваги та недоліки різних способів регулювання, наведених у табл. 1.1.

Більшість НС другого підйому України працюють в умовах, коли регулювання сумарної продуктивності станції відбувається неекономічними способами, наприклад дроселюванням. В результаті цього станція значну частину часу працює з низьким ККД, що призводить до втрат близько 30 % спожитої енергії [12].

При регулюванні продуктивності групи насосів, що працюють паралельно, з точки зору економічності регулювання, вигідним є одночасна зміна швидкості всіх насосів, що працюють паралельно [36, с. 42]. Але оскільки це пов'язано зі збільшенням капітальних затрат на обладнання всіх агрегатів регульованим електроприводом, то для більшості насосних станцій достатньо мати тільки один регульований агрегат. Глибоке регулювання продуктивності при цьому забезпечуватиметься відключенням окремих насосів [13; 37].

Враховуючи обмежену кількість можливих пусків потужних двигунів, до зміни кількості працюючих НА вдаються за нечастих змін навантаження [37].

Таблиця 1.1

**Аналіз різних способів регулювання продуктивності насосної станції**

Спосіб регулювання	Переваги	Недоліки
Дроселювання рідини в напірному трубопроводі	Простота реалізації	Неекономічність за рахунок наявності додаткового опору, можливість регулювання тільки в сторону зменшення
Пропускання частини рідини з напірної лінії у всмоктуючу	Покращує кавітаційні властивості насоса, підвищує стійкість його роботи	Зменшує коефіцієнт корисної дії системи за рахунок наявності циркуляцій потоків, потребує додаткового циркуляційного трубопроводу та установки додаткової арматури
Впуск повітря у всмоктуючий трубопровід	Більш економічний ніж дроселювання	Погіршує кавітаційні якості насоса

Спосіб регулювання	Переваги	Недоліки
Частотний спосіб регулювання	Найбільш економічний, оскільки зберігається матеріальний та енергетичний баланс системи, коефіцієнт корисної дії залишається високим при зміні частоти обертання, споживана потужність зменшується пропорційно третій степені швидкості обертання, економія перекачуваної рідини, зниження експлуатаційних затрат, підвищення якості виробництва, покращення інформованості про стан системи через покази ПЧ	Потребує установку додаткових регулюючих пристроїв і, як наслідок, значних затрат на забезпечення такого регулювання
Зміною кількості працюючих насосів	Економічність регулювання	Ступеневий характер зміни продуктивності, доцільний лише при тривалому характері зміни навантаження
Використання турбіни в пропускному трубопроводі насоса	Можливість рекуперації енергії	Додаткові затрати на установку турбіни та генератора

### 1.3. Аналіз методів та засобів для забезпечення ефективної роботи насосного агрегата

Ефективність у роботі насосного агрегата досягається підтриманням максимального значення його ККД. Останнє забезпечується застосуванням частотного способу регулювання.

Регульовані електроприводи насосів дозволяють оптимізувати їхню роботу в різних режимах, забезпечують плавний пуск, безступінчасте регулювання швидкості, роботу з необхідною швидкістю, високі енергетичні показники електроприводу (ККД, коефіцієнт потужності) [29; 30]. Це дозволяє досягти підвищення якості та ефективності роботи системи водопостачання.

В порівнянні з регульованими приводами постійного струму, частотно-регульовані електроприводи дозволяють скоротити витрати на експлуатацію, оскільки будуються на асинхронних двигунах.

Сучасні частотно-регульовані приводи, які мають внутрішню мікропроцесорну систему управління і оснащені стандартизованими інтерфейсами, надають інформацію про енергетичні (потужність, споживана електроенергія, коефіцієнт потужності, струми і напруга), виробничі (тривалість роботи, час пуску, час зупинки, аварійні ситуації) і технологічні (витрати, тиск, температура, відхилення поточного значення контрольованого параметра від заданого) параметри роботи самого привода і технологічного устаткування.

Найбільший ефект при використанні частотно-регульованих приводів виявляється при включенні їх в автоматизовані системи управління технологічними і виробничими процесами, як джерело інформації і як ланка управління технологічним процесом.

За допомогою частотно-регульованих приводів, разом з типовими датчиками і виконавчими механізмами, здійснюється своєчасний контроль ходу технологічного процесу і високоточне і надійне регулювання технологічних параметрів.

Крім того, виробничі і енергетичні параметри, що знімаються з частотно-регульованих приводів [29], забезпечують інформацією в режимі реального часу системи технічного обліку споживання енергоресурсів і системи управління виробничими процесами класу MES для оцінки ефективності використання технологічного устаткування і якості технологічного процесу.

Як показують розрахунки, підтверджені реальними умовами промислової експлуатації, термін окупності систем частотно-регульованого електроприводу складає від 0,5 року до 2-х років і постійно знижується у зв'язку із зростанням цін на електроенергію і енергоносії.

В країнах провідних виробників електротехнічного обладнання (Велика Британія, Данія, Фінляндія, Франція, США, Японія, Германія) вже давно серійно випускають енергозберігаючі частотно-регульовані електроприводи для насосних агрегатів. Сьогодні ці фірми здатні постачати такі електроприводи в діапазоні потужностей від одиниць до 1000 кВт і більше. На менші потужності (250–320 кВт) частотні регульовані електричні привода випускаються в Україні: з тиристорними



перетворювачами частоти – ХЕМЗ м. Харків та «Преобразователь» м. Запоріжжя), та транзисторні електроприводи – міжнародний консорціум «Энергосбережение» м. Харків.

Питання визначення оптимального режиму роботи НС розглядаються у роботі [38]. Продуктивність станції можна забезпечити комбінаціями увімкнених насосів. При цьому, одну і ту ж саму подачу можуть виконувати групи різних насосів. Обмеженням названого підходу є те, що продуктивності НА вважаються постійними, в результаті чого упускається питання регулювання подачі насоса. В цьому ж напрямі проведені дослідження в роботах [39; 40], де розглядається питання забезпечення потрібного значення продуктивності НС при можливості регулювання продуктивності НА. При цьому відхилення подачі від номінального значення враховується додатковими затратами енергії. При виборі оптимальних кількостей працюючих агрегатів запропоновано також враховувати тривалість напрацьованого ресурсу. Обмеженням цього підходу є неврахування сумісної роботи насосів, при якій подача кожного з них визначається режимом роботи машин, що працюють сумісно. Крім того, важко застосувати запропоновані підходи до частотно-регульованих приводів, оскільки зменшення продуктивності насоса у такий спосіб призводить до економії енергії, а не до її додаткових затрат.

Функціональна схема електромеханічної системи автоматичного керування (ЕМСАК) насосної установки, запропонованої в [41–44], показана на рис. 1.1.

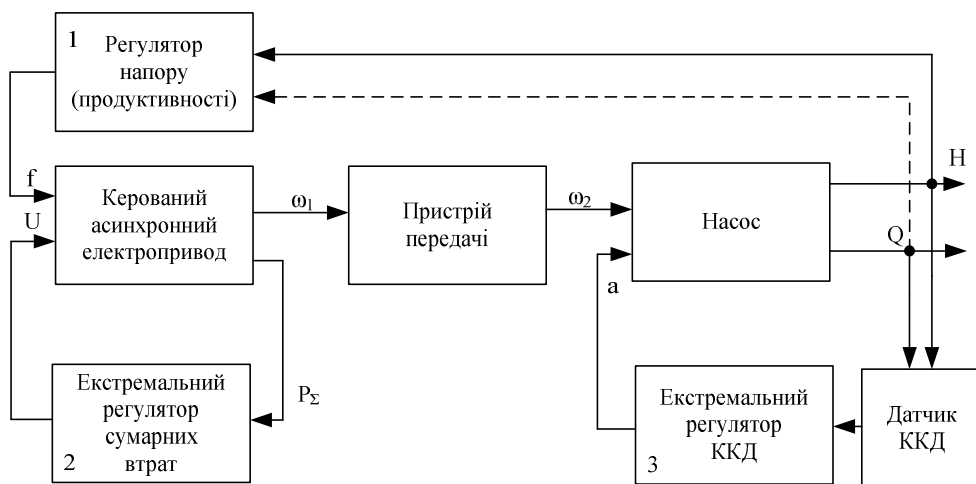


Рис. 1.1. Функціональна схема екстремальної енергозберігаючої ЕМСАК

Особливістю енергозберігаючої ЕМСАК є те, що головні технологічні завдання (із стабілізації  $Q$  або  $H$ ) виконуються за допомогою основного регулятора 1, а безпосередньо завдання енергозбереження ЕМСАК – її екстремальними системами автоматичного регулювання ККД електроприводу (ЕП) та ККД насоса (регуляторами 2, 3). Регулювання технологічного параметра (напору, продуктивності) здійснюється за рахунок зміни частоти напруги живлення асинхронного двигуна. Регулятор технологічного параметра забезпечує необхідні статичні та динамічні характеристики контуру. Екстремальний регулятор ККД насоса здійснює покроковий пошук положення засувки, при якому ККД об'єкта рівний максимальному значенню. Збуренням для контуру екстремального регулятора виступає періодична зміна режиму споживання, положення робочої точки. Екстремальний регулятор сумарних втрат у двигуні покроковими змінами напруги статора двигуна автоматично у пошуковому режимі визначає точку мінімуму втрат, яка відповідає новій величині навантаження. ЕМСАК працює в режимі коливання навколо потрібного значення контрольованого параметра [41; 43; 44]. Частота та амплітуда коливань вихідного параметра залежать від амплітуд та періодів змін  $U$  і  $a$ . Перехідні процеси в контурі технологічного параметра повинні завершуватись за час менший, ніж період зміни  $U$ , а час пошуку екстремуму втрат у двигуні не перевищувати період зміни  $a$ .

Велика увага при розробці енергозберігаючої системи в [41; 42] приділяється розробці математичної моделі насоса з екстремальним регулятором ККД та ЕМСАК насосної установки.

На рис. 1.2 показана структурна схема екстремальної енергозберігаючої системи, запропонованої в [41; 42], яка дозволяє підтримувати значення ККД насосної установки рівне максимальному.

Таким чином: «Побудова екстремальних енергозберігаючих ЕМСАК насосних установок можлива при організації автоматичного пошуку робочої точки з максимальним ККД насоса та мінімуму сумарних втрат в асинхронному електроприводі за умови стабілізації напору (продуктивності) при розташуванні вихідної робочої точки праворуч (ліворуч) від прямої максимального ККД» [41]. Додаткова економія енергії за рахунок екстремального керування залежить від положення вихідної робочої точки відносно прямої максимального ККД і може сягати більше 10 % загальних витрат енергії.

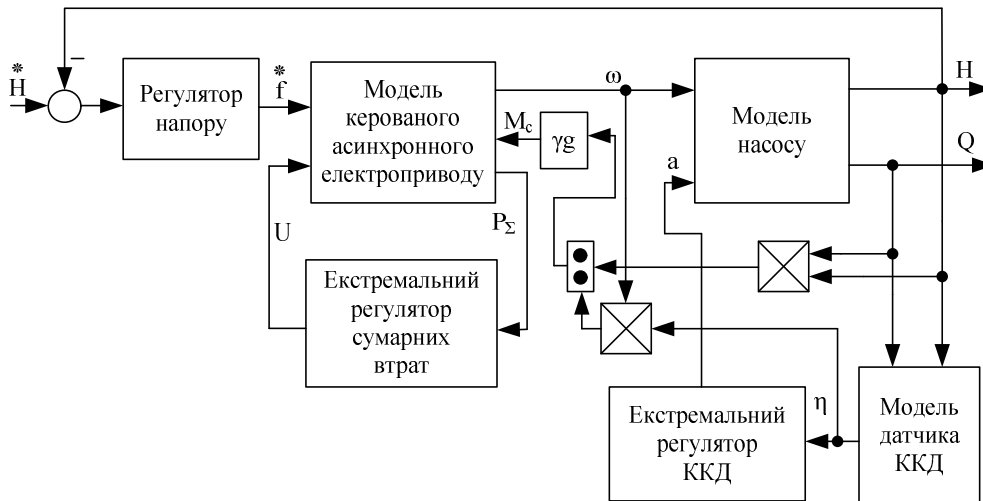


Рис. 1.2. Структурна схема екстремальної енергозберігаючої системи

Враховуючи велику потужність насосних установок, які часто сягають декількох МВт, термін окупності витрат на технічну розробку і впровадження екстремальних регуляторів не перевищуватиме одного року [41; 44].

Розглянутий метод енергозбереження не дозволяє досягти аналогічного результату при роботі насосної установки в групі насосів, що працюють паралельно, оскільки тиск, який надходить до датчика ККД, залежить від продуктивності всіх насосів.

В [45] розглядається питання підвищення енергоефективності систем міського водопостачання за рахунок вдосконалення методів управління НС з використанням електронних обчислювальних машин (ЕОМ). В умовах стохастичного середовища, характерних для міського водопостачання, завдання енергоефективного управління водопостачанням розв'язується шляхом планування режиму роботи насосних станцій і подальшого його стабілізації. Розроблено основні принципи управління системою міського водопостачання, що дозволяють оптимізувати її енерговитрати. Сформульовано умови оптимального з погляду енергоефективності розподілу навантаження між НС і цільовою функцією планування режиму роботи НС, що дозволяє здійснювати вибір насосних агрегатів (дискретне управління), які здатні з мінімальними енерговитратами виконати технологічне завдання з тиску і подачі на виході НС. Область допустимих управлінь НС сформульована у вигляді обмежень. На цій основі розроблено алгоритм планування оптимального режиму роботи НС, що дозволяє без гідравлічно-

го розрахунку водопровідної мережі з прийнятною для практики точністю оптимізувати склад працюючих НА за критерієм мінімізації витрат електроенергії. Розглянуто порядок розрахунку і сформульовані загальні рекомендації з настройки параметрів ПІ-регулятора тиску у диктуючій точці водопровідної мережі.

Обмеженнями запропонованих в [45] шляхів підвищення ефективності роботи НС є те, що задача планування оптимального режиму роботи станції не може бути вирішена без гідравлічного розрахунку водопровідної мережі; вони не враховують взаємний вплив машин, що працюють сумісно.

Питання підвищення точності і надійності керування режимом роботи двигунів магістральних насосів розглядається в роботі [46]. Запропоновано спосіб зменшення загальних затрат на встановлене обладнання та втрат електричної енергії на технологічний процес. Це все досягається керування роботою електричних двигунів, при якому контролюють потужність ввімкнених в роботу агрегатів та порівнюють її з заданою. У випадку виникнення різниці між контрольованою та заданою величинами потужності, змінюють кількість ввімкнених частотно-керованих електричних приводів магістральних насосів таким чином, щоб досягти зменшення цієї різниці.

Серед обмежень вказаного способу назвемо такі: по-перше, для реалізації того чи іншого закону керування НА станції необхідно контролювати тиск чи продуктивність на його виході, коли в запропонованому способі контролюється добуток тиску на подачу; по-друге, не завжди можливо забезпечити точне значення потрібної продуктивності НС.

Важливою задачею, яка стоїть перед фахівцями з забезпечення ефективної роботи насосного агрегата є задача вибору пристрою регулювання його продуктивності. Найкращим з точки зору економії споживаної електричної енергії при забезпеченні потрібного значення продуктивності є перетворювач частоти напруги живлення двигуна. Відповідно до [32, 33, 47] існують різні системи частотного керування електричним приводом. Серед них, як найбільш прості при реалізації, варто виділити розімкнені системи частотного керування [32; 33; 47].

На рис. 1.3 зображена функціональна схема системи частотного керування (СЧК), яка реалізує закон керування  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ , який використовується для приводу турбомеханізмів [47].

Співвідношення  $U_1/f_1^2$  стабілізується завдяки тому, що канал регулювання амплітуди напруги (керований випрямляч КВ) та канал регулювання частоти (автономний інвертор АІ) отримують однакові задавання (перший – у вигляді аналогового сигналу задавальної напруги  $u_3$ , другий – серією імпульсів, частота яких  $f_3$  пропорційна задавальній напрузі). Перетворення аналогового сигналу на послідовність імпульсів здійснюється перетворювачем «напруга–частота». Задавач інтенсивності ЗІ забезпечує плавний пуск та гальмування.

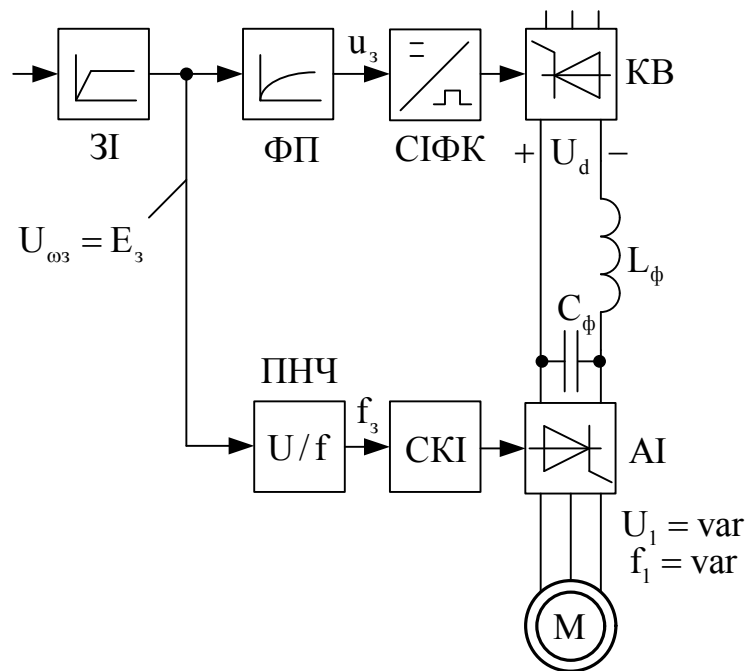


Рис. 1.3. Розімкнена СЧК з функціональним перетворювачем

ФП відтворює відповідні залежності між напругою живлення та частотою. У подібних системах закон частотного керування реалізується параметрично, без безпосереднього контролю електрорушійної сили або потоку [47].

Коефіцієнт пропорційності між напругою та частотою (тобто коефіцієнт передачі ПНЧ)

$$k_{Uf} = \frac{f_{1H}^2}{U_{1H}}$$

Для реверсу електропривода необхідно вводити спеціальний вузол, який, залежно від знака напруги, що задає швидкість, змінює порядок перемикання ключів АІ.

Діапазон регулювання розімкнених СЧК обмежений неточністю реалізації ФП, а також зростанням головного потоку зі зменшенням навантаження та частоти. Тому подібні системи працездатні лише в неширокому діапазоні регулювання швидкості та при майже незмінному навантаженні. Звичайно їх діапазон регулювання не перевищує 3–7 з незмінним статичним моментом та 10–50 при вентиляторному навантаженні.

Для компенсації спаду напруги у випрямлячі та підвищення точності реалізації закону частотного керування КВ охоплюють негативним зворотним зв'язком (33) за напругою кола постійного струму. СЧК зі 33 за напругою є подальшим розвитком системи, зображеної на рис. 1.3. Для обмеження струмів в таких системах може використовуватися контур випрямленого струму, підпорядкований регулятору напруги.

Для управління електродвигунами насосів на даний час розроблено різні засоби, які враховують особливості навантаження та вимоги технічного прогресу до можливості автоматизації процесу керування, діагностування обладнання, показання інформації про технічний стан двигуна та насоса.

Реле РДЦ-06 (ВАТ «Електротехнічний завод» (Київ)) призначене для універсального захисту двигунів глибинних насосів і насосних станцій з максимально необхідним набором можливих видів захисту. Воно має можливість передачі даних через RS485 та володіє розширеним набором функцій захисту і сервісу. РДЦ-06 забезпечує захист при відхиленні напруги живлення двигуна  $U_{ж}$  на  $\pm 30 - 35 \% U_{ж}$ . Реле передбачає вимірювання струму кожної фази трансформатора живлення двигуна, виведення інформації на індикатор, установку порогів з напруги та струму двигуна; дозволяє врахувати та задати гістерезис ланок по максимальній та мінімальній напругах, струмах, дискретність уставок по напрузі та струму; дозволяє задати різні часові параметри: затримка до пуску, час пуску тощо. Крім того реле дозволяє відрегулювати поріг спрацювання ланки вимірювання температури та має лічильник моторесурсу електродвигуна.

Відомий пристрій керування режимом роботи насосної установки [13, с. 98], що містить регульований електропривід того, або іншого типу, насос, задаючий пристрій, регулятор, датчик тиску і суматор, причому вихід датчика тиску з'єднаний з першим входом суматора,

другий вхід якого підключений до виходу задаючого пристрою, вихід суматора з'єднаний з входом регулятора, вихід якого підключений до входу регульованого електроприводу, вал якого з'єднаний з валом робочого колеса насоса.

Обмеженням цього пристрою є те, що датчик, який в ньому використовується, є надто дорогим приладом контролю, який працюючи в агресивному середовищі, з часом втрачає точність вимірювань, потребує частих перевірок, що зумовлює додаткові витрати на ремонт та обслуговування. Крім того, системи подібного роду можуть замикатися не тільки по тиску (напору), але і по продуктивності (подачі) насосної установки. В такому разі система характеризується низькими показниками надійності з причини використання двох датчиків такого типу.

В [48] розглядається питання діагностики насосного та компресорного обладнання, яка відбувається по вібрації, швидкості обертання вала двигуна, струму, який споживає двигун. Система записує стан об'єкта у базу даних, видає сигнали, повідомлення, відслідковує в режимі реального часу залишковий ресурс тощо.

#### **1.4. Вимоги до експлуатації електричних двигунів, які використовують для приводу насосів**

Відцентрові насоси (ВН) автоматично реагують на зміну тиску, змінюючи відповідним чином витрати. Характеристики насосів будуються з результатів натуральних випробувань. На водопровідних станціях зазвичай використовують насоси загального призначення, які допускають перекачування води з температурою до 85 °С і з вмістом твердих включень до 3 г/л, розміром не більше 0,1–0,2 мм.

Компактність конструкції, простота з'єднання з насосом, легка автоматизація керування і відносно низькі експлуатаційні затрати визначають масове застосування електричних двигунів змінного струму в якості приводу для насосів систем водопостачання та каналізації [3, с. 123]. До привідних електродвигунів насосних агрегатів висувається низка специфічних вимог. Однією з них є необхідність пуску двигуна під навантаженням. Конструкція електродвигуна повинна також допускати достатньо тривале обертання ротора в протилежну сторону, яке

зумовлюється зливом води з напірних трубопроводів після відключення двигуна від мережі при плановій або аварійній зупинці агрегата. Для покращення умов роботи енергетичних систем, де застосовуються потужні насосні станції, бажано використовувати електричні двигуни з можливістю реалізації частих повторних пусків. Це, в свою чергу, висуває підвищенні вимоги до конструкції обмотки статора та пускової обмотки електричного двигуна, нагрівання яких визначає тривалість потрібної паузи між пусками та допустиме число пусків за досліджуваний період.

Електричний двигун підбирається за частотою обертання, робочим положенням (горизонтальне, вертикальне), потужністю, напругою і типом виконання [14]. Для ЕП ВН застосовують синхронні і асинхронні двигуни (АД).

У переважній більшості випадків вали насосів і двигунів з'єднуються безпосередньо (без варіаторів частоти обертання) за допомогою пружних муфт.

Для приводу насосів малої та середньої потужності часто використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 4А. В довіднику [49] наведено вимоги до експлуатації двигунів серії 4А, їх паспортні дані. Розрахунковий термін роботи двигунів основного виконання цієї серії становить не менше 15 років при напрацюванні 40 тис. год. Напрацювання обмотки статора – не менше 20 тис. год., розрахункове напрацювання підшипників – не менше 14 тис. год. Ймовірність безвідмовної роботи становить 0,9 за 10 тис. год. напрацювання. Клас нагрівостійкості системи ізоляції двигунів з висотами осі обертання 50–132 мм – *B* та двигунів з висотами осі обертання 160–355 мм – *F*. В [49] наведені паспортні дані двигунів серій 4А, 4АН, 4АР та 4АС. Серед них вкажемо на відношення пускового, мінімального та максимального моментів до номінального, номінальне та критичне ковзання, відношення пускового струму до номінального, початкову швидкість наростання температури обмотки статора при загальмованому роторі та пуску двигуна з холодного стану, тривалість пуску, допустиме число пусків за годину при відсутності статичного та динамічного моментів опору на валу двигуна.

Відповідно до [49, с. 65] двигун, нагрітий до робочої температури, допускає один пуск з гранично допустимим динамічним моментом інерції на валу. З холодного стану ж допускається два послідовних



пуски з гранично допустимим динамічним моментом інерції на валу та зупинкою двигуна між пусками. Значення гранично допустимих кількостей пусків за годину та граничнодопустимого моменту інерції визначаються граничнодопустимою температурою обмотки статора або ротора двигуна. При розрахунку цих величин температура обмотки статора приймається рівною гранично допустимій для класу нагрівостійкості ізоляційної системи при тривалій роботі двигуна.

Двигуни великої потужності обладнуються температурним захистом, який спрацьовує при перевищенні температури обмотки статора граничнодопустимого значення. Відповідно до [50, с. 65] це значення температури для ізоляційних систем класу нагрівостійкості *B* становить 200 °С; для ізоляційних систем класу нагрівостійкості *F* – 225 °С. Температура ж обмотки ротора не повинна перевищувати 250 °С.

В [50] наводяться основні паспортні дані асинхронних двигунів серії А4 з напругою живлення 10 кВ і потужністю 500–800 кВт. Середнє напрацювання на відмову складає 15000 год. Номінальний режим роботи двигунів за ГОСТом 183-74 [50, с. 89] S1. Двигуни мають прямий пуск при номінальній напрузі мережі живлення та при зниженні напруги мережі за час пуску до  $0,8U_{ном}$ . Двигуни допускають два пуски підряд з інтервалом 5 хвилин з холодного стану або один з гарячого при середньому гальмівному моменті механізму 0,3 номінального і максимально допустимих динамічних моментах механізму не вищих за наведені в [50, с. 89].

Інтервал між пусками відповідно до [50, с. 90] становить не менше 3 години. Кількість пусків в рік не повинна перевищувати 250, а за термін служби – 2000. Клас нагрівостійкості ізоляції обмотки статора за ГОСТом 8865-87 – *F* з температурним використанням на рівні класу *B*. Ізоляція терморезистивна типу «Моноліт-2».

Часто для приводу ВН систем міського водопостачання (НС першого та другого підйомів) використовуються АД великої потужності та напругою живлення більшою 1000 В. Загальні технічні умови експлуатації цих двигунів описані в [51]. Відповідно до [51] допустима кількість пусків за рік і за термін служби, допустиме зниження напруги живлення при пуску, кількість послідовних пусків з холодного та гарячого станів, можливість пуску двигунів під навантаженням, тривалість інтервалів між пусками, гранично допустимі моменти інерції веденого механізму повинні встановлюватися у стандартах або техні-

чних умовах на двигуни конкретних типів. Двигуни з діаметром осердя статора більшим 1 м та двигуни потужністю більшою 1000 кВт повинні мати для контролю теплового стану обмотки та осердя статора вбудовані термоперетворювачі опору за ГОСТом 6651-84 або технічними умовами на перетворювачі конкретних типів. Необхідність та способи теплоконтролю інших двигунів встановлюють у стандартах або технічних умовах на двигуни конкретних типів [51, с. 5]. Для двигунів [51, с. 6] встановлюють такі показники надійності: термін служби до капітального ремонту – 5 років; коефіцієнт готовності – не менше 0,99; повний термін служби – 20 років; середнє значення напрацювання на відмову – не менше 12000 год.

При виборі насоса або групи насосів, які вмикаються в роботу, необхідно враховувати значення та характер зміни продуктивностей, тривалість роботи установки з тією, чи іншою продуктивністю, забезпечуючи при цьому мінімальне число ввімкнень, чи вимкнень [13, с. 50].

Як вже зазначалося, нормативними документами на НА визначається допустима кількість ввімкнень за рік. Якщо з досвіду експлуатації відомо, що тривалість роботи одного насоса буде невеликою і через короткий проміжок часу його потрібно буде вимкнути, то краще не вмикати його в роботу, а ввімкнути відразу наступний, якщо навіть при цьому режим роботи агрегата буде не оптимальним [13, с. 50–51].

Для забезпечення більш ефективної роботи насосних агрегатів, в роботі потрібно тримати ті з них, які мають більш високі ККД [13, с. 52; 52]. В другому джерелі доведено, що правильна організація роботи групи насосів, що працюють паралельно, дозволяє суттєво зменшити річне споживання енергії [13, с. 52].

Відомий пристрій для визначення ресурсу електричних машин [53], що містить сенсор вимірювального параметра, елемент затримки, формувачі імпульсів, генератор несинусоїдальних коливань, селектор, генератор тактових імпульсів, логічні елементи І, АБО, подільники частоти, лічильники.

Використання пристрою дозволяє збільшити точність визначення напрацьованого ресурсу, і, як наслідок, більш раціональніше та обґрунтованіше призначати терміни та об'єми ремонтів двигунів. Це дозволяє досягти зменшення експлуатаційних витрат на ремонт та підви-

щити надійність роботи обладнання за рахунок своєчасного поточного ремонту [53 с. 5–6].

Обмеженням пристрою є те, що він не дозволяє забезпечити витримку часу між пусками та не враховує обмеження на кількість прямих пусків з холодного та гарячого станів двигуна.

Діагностику температурного стану електричного двигуна постійного струму дозволяє здійснити пристрій для контролю електричного двигуна [54], який складається з сенсора струму обмотки якоря, аналого-цифрових перетворювачів, лічильників імпульсів, розподільників тактів, логічних елементів І, АБО, АБО-НІ, генераторів імпульсів, цифрових компараторів, регістра, суматорів, задавачів ресурсу та опорів обмотки якоря і збудження, функціональних перетворювачів, блока установки нуля, перетворювача напруги, задавача коду, задавача швидкості зміни температури, диференціального підсилювача, двійкового лічильника ресурсу, підсилювачів сигналу, сенсора струму обмотки збудження, сенсора напруги мережі, сенсора напруги якірної обмотки двигуна.

Пристрій забезпечує сигналізацію про вичерпання ресурсу двигуна в залежності від температурних параметрів обмоток якоря та збудження, від швидкості наростання температури кола якоря двигуна та рівня вібрацій.

Обмеженням пристрою є відсутність можливості контролю кількості пусків двигуна та забезпечення витримки часу між пусками; неможливість врахування обмежень на кількість пусків з холодного та гарячого станів.

## **РОЗДІЛ 2**

### **МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Витрати НС, які використовуються в системах транспортування і розподілу води, визначаються шляхом розв'язання загальносистемних задач керування і забезпечуються набором насосів, що одночасно працюють, з різними продуктивностями. Потрібні витрати НС зазвичай не відповідають дискретним значенням, які отримують простим набором різних насосів. Тому, продуктивності насосів регулюють шляхом зміни гідравлічного опору, потужності і частоти змінного струму. Крім того, потужні насосні агрегати мають технологічні обмеження на частоту їх перемикання.

Оптимальні режими роботи НС вибираються розв'язанням оптимізаційних задач, які потребують великих затрат праці. Розв'язання таких задач проводиться на електронно-обчислювальній машині (ЕОМ) із використанням методів математичного програмування. В роботі розглядається кілька варіантів задач оптимізації режимів роботи НС.

#### **2.1. Визначення оптимального способу регулювання продуктивності насосної станції водопостачання**

Задача полягає у застосуванні такого способу регулювання продуктивності станції, при якому забезпечується точне значення подачі в широких межах і споживається найменша кількість ЕЕ [55]. Якщо ж кількість рідини, яку генерує НС в МВ буде відрізнитися від кількості рідини, яку в даний момент може спожити споживач, то це негативно проявлятиметься на роботі всієї системи водопостачання і вилитиметься в додаткові затрати енергії та скорочення терміну роботи обладнання.

Установка на двигунах потужних насосів перетворювачів частоти (ПЧ) дозволяє зменшити кількість споживаної ними енергії пропорційно кубу зменшення швидкості обертання. Такий спосіб регулювання продуктивності визнаний як найбільш ефективний з точки зору

енергозатрат, але є одним з найдорожчих з точки зору капітальних затрат.

Найкращий ефект для забезпечення точного значення продуктивності та узгодженої роботи насосів дає установка ПЧ на всі працюючі двигуни. Але оскільки це пов'язано з суттєвими затратами на їх придбання та установку, то вдаються до зменшення кількості ПЧ. Розглянемо задачу визначення кількості регульованих по частоті НА, при якій забезпечується зміна продуктивності станції в заданих межах.

Продуктивність групи насосів, що працюють паралельно, можна регулювати будь-якою кількістю регульованих НА. Складність полягає в тому, що чим більше насосів працює паралельно, тим менший вплив одного з них на продуктивність всієї групи [54]. Виходячи з цих уявлень максимальну кількість насосів, що працюють паралельно, обмежують.

Потреби міста у воді задаються графіком водоспоживання, зображеним на рис. 2.1.

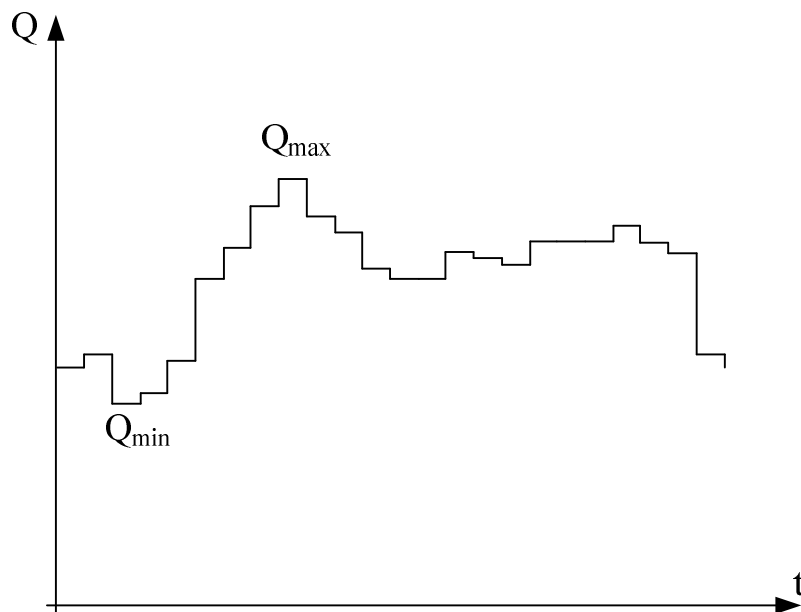


Рис. 2.1. Графік водопостачання НС другого підйому

Для спрощення прийнято, що кожену годину потреби міста у воді постійні, тому графік має ступеневу форму.

Якщо гідравлічна система не має ємності, яка акумулює певний об'єм рідини, то в будь-який момент насоси повинні давати в мережу об'єм рідини, рівний потребам споживача.

При проходженні пікової частини графіка (див. рис. 2.1) насоси повинні забезпечувати максимальне значення продуктивності  $Q_{\max}$ .

Якщо установка складається лише із одного робочого насоса, то він повинен бути обраний на подачу не меншою ніж  $Q_{\max}$  і мати можливість глибокого регулювання до мінімально потрібного значення  $Q_{\min}$ . Оскільки регулювання пов'язане з втратами енергії, то такий насос буде мати низький експлуатаційний ККД. Крім того, вимога безперебійності подачі води в мережу зумовлює необхідність установки резервного насоса з подачею не меншою ніж  $Q_{\max}$ , тому що при одному робочому насосі вимагається резерв 100 %. Такий варіант буде невигідним через високу вартість резерву і втрати енергії при експлуатації або значні капітальні затрати на забезпечення регулювання [58].

Установка двох однакових насосів може суттєво підвищити енергетичну ефективність експлуатації і знизити аварійний резерв до 50 % [17]. Взагалі збільшення кількості робочих насосів зменшує аварійний резерв установки і при сприятливій формі характеристики  $\eta = f(Q)$  забезпечує енергетично ефективну експлуатацію [56, с. 17].

На основі викладеного більшість НС виконується у вигляді ряду насосів, які вмикаються в мережу паралельно. Якщо на одну лінію паралельно вмикається декілька насосів, то продуктивність в лінії буде рівна сумі продуктивностей всіх насосів, що працюють, а тиски, які вони розвиватимуть, будуть фактично однаковими [59]. Ця обставина дозволяє побудувати сумарну характеристику для всієї групи насосів, що працюють паралельно.

При розрахунку потужності двигуна для приводу насоса слід врахувати можливе збільшення потужності на валу при відхиленні режиму від розрахункового. Ця обставина вимагає деякого запасу потужності двигуна і враховується коефіцієнтом запасу потужності [17; 60]. Потужність, необхідна для приводу насоса, визначається з формули

$$P_H = k \frac{\rho \cdot g \cdot Q_M \cdot H_M}{1000 \cdot \eta_M \eta_{II}}, \quad (2.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу, який враховує можливі перевантаження електродвигуна при експлуатації, наприклад, при запуску (в залежності

від потужності двигуна, наведений в табл. А.1;  $\rho$  – густина речовини що перекачується,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – прискорення сили земного тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $Q_M$  – подача насоса, максимально можлива в схемі спроектованої насосної станції,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H_M$  – напір, відповідний максимально можливій подачі  $Q_M$ ,  $\text{м}$ ;  $\eta_M$  – ККД насоса, відповідний  $Q_M$ ;  $\eta_n$  – ККД передачі (при з'єднанні насоса з двигуном через пружну муфту ( $\eta_n = 1$ )).

Максимально можлива подача одного насоса при відключенні інших насосів визначається по графіку сумісної роботи. Для побудови такого графіка максимально можливу подачу  $Q_M$  можна визначити з формули [17]

$$Q_M = k_M Q_H,$$

де  $Q_H$  – подача робочого насоса;  $k_M$  – коефіцієнт, який враховує збільшення подачі одного робочого насоса при відключенні інших; в залежності від числа робочих насосів, наведений в табл. А.2.

Для п'яти насосів номінальне значення продуктивності кожного з них повинне бути не меншим за

$$Q'_M = \frac{k_M Q_H}{n}.$$

Припустимо, що для подачі рідини відповідно до графіка водопостачання (див. рис. 2.1) використовується два види насосів, параметри яких наведені в табл. А.3.

Розглянемо насосну станцію другого підйому м. Вінниця, потрібне значення продуктивності якої повинне відповідати графіку, зображеному на рис. 2.2 [61; 62; 63; 64; 65; 66].

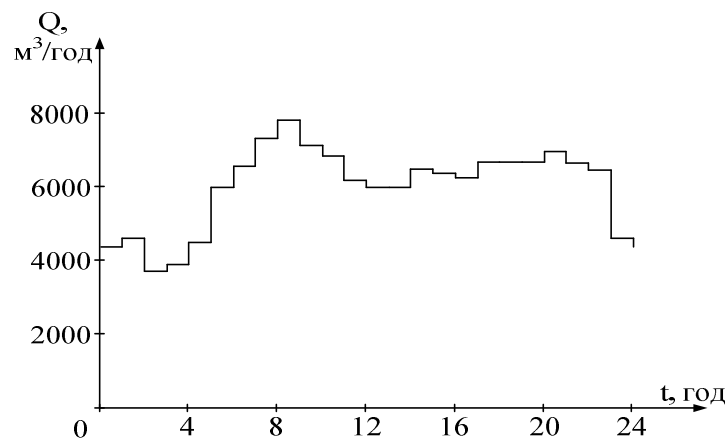


Рис. 2.2. Графік водопостачання НС другого підйому м. Вінниця

Подачу необхідної кількості рідини в години максимального споживання забезпечують три насоси типу Д 2000–100 (надалі насоси першого типу) і два насоси типу Д 1250–125 (надалі насоси другого типу). Приклад залежностей потужності, тиску та ККД насоса другого типу від його продуктивності показана на рис. А.1.

З табл. А.1 обираємо коефіцієнт запасу  $k = 1.1$ .

Номінальне значення продуктивностей насосів першого та другого типу  $Q_{м1} = 0,556 \text{ (м}^3/\text{с)}$ ,  $Q_{м2} = 0,556 \text{ (м}^3/\text{с)}$ .

Використовуючи лінійну інтерполяцію в математичному пакеті Mathcad знаходимо значення тиску та ККД, відповідні отриманому значенню продуктивності:  $H_{м1}=99,263 \text{ м}$ ,  $\eta_{м1}=76,737\%$  для насоса першого типу, і  $H_{м2}=124,917 \text{ м}$ ,  $\eta_{м2}=75,361\%$  – для насосів другого типу. Потужність, необхідна для приводу насосів першого типу  $P_{н1} = 774,692 \text{ (кВт)}$ ,  $P_{н2} = 620,4023 \text{ (кВт)}$ .

При виборі двигуна для роботи в тривалому режимі доцільно обирати двигун, для якого цей режим буде номінальним, тобто, повинні виконуватися умови  $M_{н} \leq M_{ном}$ , та  $P_{н} \leq P_{ном}$ .

Номінальна подача води в мережу всіма насосними агрегатами:

$$Q_{\Sigma} = 3 \cdot Q_1 + 2 \cdot Q_2 = 3 \cdot 2000 + 2 \cdot 1250 = 8500 \text{ (м}^3/\text{год.)}$$

Для приводу насосів першого та другого типів оберемо АД потужністю відповідно 800 та 630 кВт.

Паспортні дані АД серії 4А [67, с. 326; 50] зведені в табл. А.4.

Обмотка статора двохшарова петлева із обмоточного дроту марки ПЕТВСД без додаткової виткової ізоляції. Корпусна ізоляція – термореактивна, класу нагрівостійкості  $F$ , при цьому температури частин обмотки не перевищують передбачених для ізоляції класу  $V$ . Тепловий стан обмотки і сердечника статора контролюють мідними термометрами опору, укладеними в пази.

Двигун допускає прямий пуск від номінальної напруги мережі. Із холодного стану з інтервалом не менше 5 хв. можливі два пуски, із гарячого стану допускається один пуск [50; 67, с. 326].

Розглянемо насосну станцію, яка працює за певним графіком водопостачання і складається з  $n$  ввімкнених паралельно насосних агрегатів. Позначимо продуктивності цих агрегатів  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ,  $\text{м}^3/\text{год.}$ , а потужності кожного з них –  $c_1, c_2, \dots, c_n$  [1; 56; 39; 57]. Потужність, яку споживає двигун з мережі, розрахуємо з формули [10]



$$c = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_M \cdot \eta_{II} \cdot \eta_D}, \quad (2.2)$$

де  $\eta_D$  – коефіцієнт корисної дії двигуна;  $H$  – тиск, відповідний продуктивності  $Q$  насоса, м.

Припустимо, що насосні агрегати можна ввімкнути і вимкнути в будь-який момент часу. Введемо змінні  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , які характеризують роботу так, що коли ввімкнений  $i$ -й насос, то приймається  $x_i = 1$ , в протилежному випадку  $x_i = 0$ . З врахуванням цього, загальні затрати потужності на роботу насосів з певним значенням продуктивності

становитимуть  $c = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i$ , а подача НС за цей час –  $Q_{\text{реал}} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_i$ .

Для забезпечення потрібних витрат задачу можна сформулювати таким чином: потрібно знайти такі послідовності чисел  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , щоб мінімізувати затрати потужності

$$c = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \rightarrow \min \quad (2.3)$$

і задовольнялись обмеження:

- на забезпечення потрібних витрат НС

$$\sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_i \geq Q_{\text{потр}}; \quad (2.4)$$

- на змінні  $x_i$

$$x_i = 0 \text{ або } 1, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.5)$$

В більшості систем забезпечення водоспоживання використовують потужні насоси, на які накладаються технологічні обмеження на тривалість безперервної роботи [39, с. 63]. Тому, в [40, с. 63] запропоновано варіант задачі, у якій також враховується час безперервної роботи насосів. Для цього введемо  $t_i$  – час безперервної роботи  $i$ -го і  $Z_{\text{мех.}i}$  – механічний знос  $i$ -го насоса при роботі протягом одиничного проміжку часу (1 год.).

Як зазначається в [68] ККД електричного двигуна змінюється від 0,7 для потужності 1,1 кВт до 0,96 для потужності 100 кВт і мало за-

лежить від роботи насоса. Вибір електричного двигуна мало впливає на енергоефективність системи водопостачання в цілому. Суттєвіший вплив на систему чинить ККД насоса. Відповідно до [68] ККД насоса на оптимальній подачі може бути в межах 0,3 – 0,8 в залежності від типу насоса, його ККД тощо. Тому величина  $Z_{\text{мех}}$  визначатиме ККД насоса.

Відомо, що енергоефективність насоса з часом зменшується і при проходженні певного періоду необхідно виконувати поточні ремонти, замінювати ті чи інші робочі частини. В [69] говориться про те, що за рекомендований термін служби насоса його енергоефективність зменшується вдвічі. Тобто по проходженні рекомендованих термінів насос потребує вдвічі більших затрат потужності ніж на початку експлуатації. Ця обставина дозволяє запропонувати підхід до знаходження  $Z_{\text{мех}}$

$$Z_{\text{мех}} = \frac{c}{T},$$

де  $T$  – рекомендований чи гарантований термін експлуатації насоса. Відповідно до [3, с. 77] гарантійний ресурс ВН двостороннього входу складає 20 тис. год.

Введемо поняття електричного зносу НА. Явище електричного зносу присутнє в перехідних режимах роботи агрегата коли перегрівається його статорна обмотка. В результаті перегрівання ізоляція висихає, зменшується її механічна пружність, знижується пробивна напруга [67, с. 46], тобто вона втрачає свої ізолюючі властивості. Крім того в процесі експлуатації в перехідних режимах роботи ізоляція статорної обмотки двигуна піддається значним динамічними зусиллями, що також призводить до зменшення пружності та погіршення ізолюючих властивостей. Найбільшому негативному впливі ізоляція піддається під час прямого пуску двигуна, тому в якості фактора, який призводить до електричного зносу, розглядається кількість його прямих пусків.

Позначимо  $Z_{\text{ел.і}}$  – електричний знос ізоляції обмоток, контактних з'єднань і-го двигуна за один пуск. Величина електричного зносу передбачає наявність ресурсу, який буде поступово вичерпуватися в процесі експлуатації під час запусків. При вичерпанні цього ресурсу двигун не можна більше запускати прямим пуском. Під час кожного

наступного запуску витрачається певна кількість енергії. Якщо електричний знос звести до потужності, то він собою представлятиме потужність, яка витрачається на пуск насосної установки. Кількість реалізованих двигуном пусків за період експлуатації позначимо  $N_{\text{п}}$ .

Потрібне значення продуктивності  $Q_{\text{потр}}$  визначається з графіка водопостачання (див. рис. 2.2) в кожну годину доби.

Розглянемо випадок коли продуктивність кожного насоса може бути відмінною від номінального значення [40].

Позначимо через  $c'_i$  додаткові витрати потужності, пов'язані відхиленням подачі насоса від її номінального значення  $Q_i^{\text{ном}}$ ,  $i = \overline{1, n}$  [58, с. 139].

Таким чином, цільова функція (2.3) дозволить знайти такі значення змінних  $x$ , при яких забезпечується мінімальне споживання електричної енергії НА з врахуванням таких особливостей: споживання енергії на забезпечення потрібної подачі; споживання енергії на забезпечення подачі, більшої за номінальну; електричного та механічного зносу обладнання. Всі ці складові можуть мати різну вагу в функції цілі, тому їх варто враховувати зі своїми ваговими коефіцієнтами. Вагові коефіцієнти позначимо відповідно  $a, b, d, e$ .

З врахуванням зазначеного цільова функція мінімуму споживаної ЕС електроенергії при роботі без протитиску запишеться

$$c = \sum_{i=1}^n \left( a \cdot c_i + b \cdot c'_i \cdot |Q_i^{\text{ном}} - Q_i| + d \cdot Z_{\text{мех}} \cdot t_i + e \cdot Z_{\text{ел}} \cdot N_{\text{п}_i} \right) x_i \rightarrow \min. \quad (2.6)$$

Потрібно знайти такі значення змінних  $x_i$ , при яких буде забезпечуватися точне значення потрібної продуктивності всієї станції

$$\sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_i = Q_{\text{потр}}. \quad (2.7)$$

Для кожного увімкненого НА, при роботі на мережу без протитиску, справджується рівність

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{Q_1^3}{Q_2^3}, \text{ або } \frac{c_k}{c_{\text{н}}} = \frac{Q_k^3}{Q_{\text{н}}^3}, \quad (2.8)$$

де  $P_1, P_2$  – відповідно потужності, необхідні для приводу насоса в перший та другий моменти часу;  $Q_1, Q_2$  – кількість рідини, що подається у відповідні моменти часу;  $c_k, Q_k$  – відповідно потужність та подача

рідини в  $k$ -й момент часу;  $c_n, Q_n$  – відповідно номінальні значення потужності та подачі рідини певного насосного агрегату.

Записавши рівняння (2.8) для двох моментів часу та віднявши від одного рівняння інше, отримаємо

$$\frac{c_1 - c_2}{c_n} = \frac{Q_1^3 - Q_2^3}{Q_n^3}. \quad (2.9)$$

Припустимо, що в перший момент часу насос працює в оптимальному (номінальному) режимі роботи, тобто  $Q_1 = Q^o, c_1 = c^o$ , тоді для  $k$ -го моменту часу (2.9) переписеться

$$c^o - c_k = \frac{c^o}{Q^{o3}} (Q^{o3} - Q_k^3).$$

Оскільки  $\frac{Q_k}{Q^o} = x_k$ , то отримаємо

$$c^o - c_k = c^o (1 - x_k^3). \quad (2.10)$$

Різниця потужностей в лівій частині (2.10) вказує на втрати ЕЕ, спожитої при відхиленні подачі НА від її номінального значення. Ця кількість енергії, з врахуванням втрат в двигуні, є аналогом складової  $c'_k x_k |Q^o - Q_k|$  в цільовій функції (2.6). Враховуючи те, що споживання ЕЕ та змінна  $x_k$  при відхиленні продуктивності насоса від номінальної не можуть бути від'ємним, отримаємо рівність

$$c'_k x_k |Q^o - Q_k| = \frac{c^o}{\eta_d} |1 - x_k^3|.$$

Винесемо в лівій частині виразу  $Q^o$  за дужки. Отримаємо

$$c'_k x_k Q^o \left| 1 - \frac{Q_k}{Q^o} \right| = \frac{c^o}{\eta_d} |1 - x_k^3|,$$

$$c'_k x_k Q^o |1 - x_k| = \frac{c^o}{\eta_d} |1 - x_k| \cdot |1 + x_k + x_k^2|.$$

Оскільки складова втрат ЕЕ присутня лише при відхиленні продуктивності від номінальної, то різниця  $|1 - x_k|$  у цій складовій не буде

дорівнювати нулю. Поділимо на неї ліву та праву частину отриманого виразу і знайдемо чому дорівнює  $c'_k$ .

$$c'_k x_k Q^o = \frac{c^o}{\eta_d} |1 + x_k + x_k^2|.$$

$$c'_k = \frac{c^o}{\eta_d Q^o} \frac{|1 + x_k + x_k^2|}{x_k}. \quad (2.11)$$

Для п'яти НА, а саме трьох НА з насосами першого типу та двох з насосами другого типу, розв'язавши задачу оптимізації цільової функції (2.6) з врахуванням обмежень (2.7) та того, що змінна  $x_i$  змінюється від 0 до 1:

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i=\overline{1,n},$$

можна знайти комбінації ввімкнених НА. Названа задача може бути розв'язана програмою Microsoft Office Excel з використанням функції «Поиск решения». Приклад використання функції «Поиск решения» показано на рис. Б.1, а параметри оптимізації за замовчуванням – на рис. Б.2. Для розв'язання задачі використовується метод Ньютона.

Розглянемо НС другого підйому м. Вінниці. Продуктивність станції має відповідати графіку водопостачання, показаному на рис. 2.2. Станція складається з п'яти НА двох типів, а саме: трьох НА першого типу та двох – другого.

Величини механічного зносу НА станції становитимуть:  $Z_{\text{мех.1}} = Z_{\text{мех.2}} = Z_{\text{мех.3}} = 0,037$  (кВт/год.),  $Z_{\text{мех.4}} = Z_{\text{мех.5}} = 0,03$  (кВт/год.).

Втрати енергії за один пуск кожного з двигунів насосів будуть різними (додаток В):  $Z_{\text{ел(1)}} = 211,285$  (кВт),  $Z_{\text{ел(2)}} = 162,635$  (кВт).

В табл. 2.1 зведено інформацію про кількість регульованих НА, їх потужність, вартість спожитої ЕЕ за рік, вартість перетворювальних пристроїв [70].

Для наочності сумарні річні затрати для розглянутих режимів роботи показані на рис. 2.3. На рис. 2.4 показано графіки сумарного добового споживання ЕЕ для всіх режимів роботи.

Таблиця 2.1

## Дані оцінки ефективності роботи НС

	Потужність, кВт	Один. вимір	Режим роботи					
			1	2	3	4	5	6
Кількість перетворювальних пристроїв для заданої потужності перетворення	800	шт.	0	3	0	0	1	2
Питома вартість одного кіловата потужності перетворювача	630	шт.	0	2	1	2	2	2
Затрати на перетворювальні пристрої	800	у. од.	0	240000	0	0	80000	160000
Загальні затрати на перетворювачі	630	у. од.	0	126000	63000	126000	126000	126000
Питома вартість одного кіловата спожитої електричної енергії		у. од.	0	366000	63000	126000	206000	286000
			0,04950495					
Кількість спожитої ЕЕ насосною станцією за добу		кВт	147682,95	135725,25	137445,08	134539,26	137781,34	138201,22
Вартість спожитої ЕЕ НС за добу		у. од.	7311,04	6719,07	6804,21	6660,36	6820,86	6841,64
Значення надлишкової подачі рідини в водорозподільну мережу		м <sup>3</sup>	20480,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Вартість спожитої ЕЕ НС за рік		у. од.	2668528,64	2452461,22	2483537,35	2431031,17	2489613,26	2497200,33
Термін окупності обладнання на забезпечення регулювання продуктивності НС		міс.		20,33	4,09	6,37	13,82	20,03

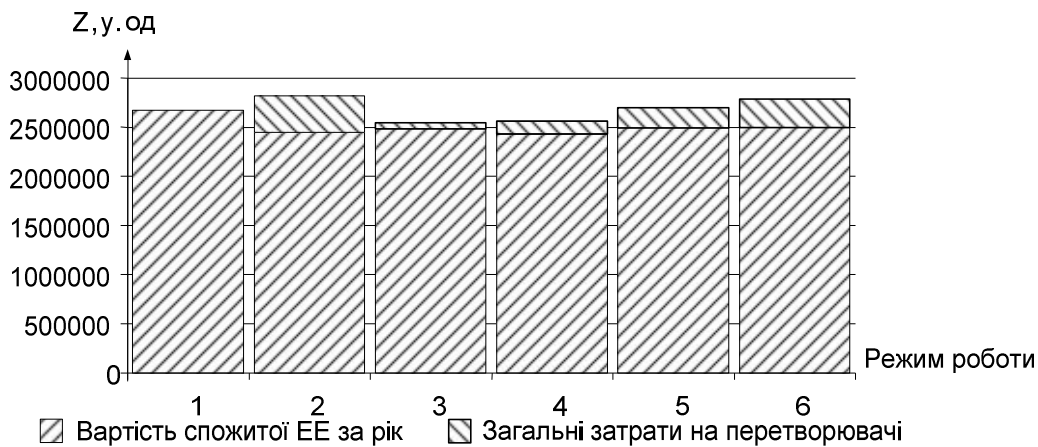


Рис. 2.3. Сумарні річні затрати при всіх нерегульованих НА (1), всіх регульованих НА (2), регулюванні продуктивності одного НА (3), регулюванні продуктивності двох НА (4), регулюванні продуктивності трьох НА (5), регулюванні продуктивності чотирьох НА (6)

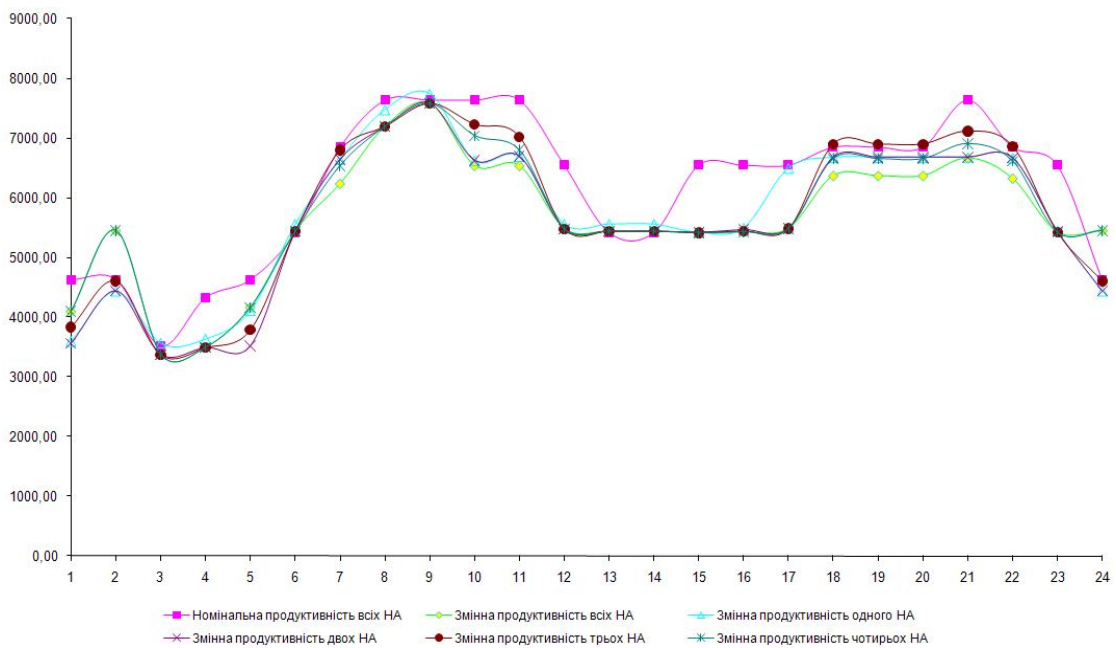


Рис. 2.4. Добове споживання ЕЕ для кожного режиму роботи

Таким чином, з точки зору затрат ЕЕ при різних режимах роботи більш вигідним є зміна продуктивності двох НА. Однак, з врахуванням вартості додаткового обладнання (з розрахунку 100 у.од./1кВт потужності) більш вигідним стає зміна продуктивності одного НА. Отримані результати збігаються з рекомендаціями, щодо забезпечення економічного регулювання продуктивності НС, показаними в [3, с. 62].

Розрахунки показали, що термін окупності обладнання для розглянутих режимів роботи НС змінюється в межах від 4 до 20 місяців.

## 2.2. Визначення комбінацій ввімкнених двигунів насосних агрегатів

В результаті розв'язання задачі оптимізації (2.3) з врахуванням механічного та електричного зносу обладнання, знаходимо такі комбінації  $x_i$ , при яких сумарна продуктивність всіх насосів буде не меншою за потрібне значення продуктивності, що відповідає графіку водоспоживання.

Але при паралельній роботі НА продуктивність кожного з них визначатиметься параметрами швидкості обертання привідних двигунів насосів та параметрами МВ. Тому, щоб оцінити дійсне споживання ЕЕ кожним НА, потрібно розглянути їх паралельну роботу.

При розрахунку сумісної роботи НА на мережу водопостачання продуктивності кожного з НА відрізняться від номінальних значень. Це зумовлено тим, що зі збільшенням кількості насосів, що працюють паралельно, збільшується опір трубопроводу, а, відповідно, і зменшується подача кожного з них [71, с. 219]. Крім того, загальне значення продуктивності станції визначатиметься залежно від тиску, необхідного для підняття рідини на найвищу точку міста. Крім того, додаткову нерівномірність у продуктивності НА, які працюють у групі, вносить те, що їхні характеристики можуть відрізнятися.

Рівняння насоса, яке пов'язує тиск на його виході з продуктивністю та відносною швидкістю обертання робочого колеса, може мати вигляд [75, с. 184]:

- для насосів,  $H - Q$  характеристика яких має максимум

$$H(v, Q) = A_1 v^2 + B_1 v Q + C_1 Q^2; \quad (2.16)$$

- для насосів з пологими характеристиками

$$H(v, Q) = A_2 v^2 + C_2 Q^2, \quad (2.17)$$

де  $H$  – тиск на виході насоса, м;  $v$  – відносна швидкість обертання робочого колеса насоса, в.од.;  $Q$  – продуктивність насоса, м<sup>3</sup>/год.;  $A_1, B_1, C_1, A_2, C_2$  – коефіцієнти апроксимації, які залежать від конструктивних



особливостей турбомеханізму і визначаються з паспортних характеристик насоса.

Напірно-витратна характеристика мережі згідно з [72] описується залежністю

$$H = H_c + R_c Q^2, \quad (2.18)$$

де  $H_c$  – статичний напір, необхідний для підйому рідини на визначену висоту (геодезичний напір);  $R_c$  – гідродинамічний опір мережі водопостачання.

Найбільш сприятливий режим роботи системи НА–МВ визначається точкою перетину витратної характеристики мережі і сумарної витратної характеристики механізму [58]. При однакових насосах підключення другого насоса паралельно першому збільшує подачу установки в 2 рази лише в тому випадку, коли загальний трубопровід системи не створює гідравлічного (або він не значний) опору. Чим більший гідравлічний опір трубопроводу, тим крутіше піднімається його характеристика і тим менше збільшується подача установки при паралельному ввімкненні другого насоса. Спостерігається і зворотне явище: якщо один із насосів, що працюють паралельно, вимкнути, то інші, що залишилися в роботі, самовільно збільшують подачу і потужність. Це пояснюється тим, що при вимкненні одного із насосів подача установки зменшується, гідравлічний опір загального трубопроводу падає, тиск у вузловому перерізі знижується і насоси, які залишилися в роботі, будуть працювати при зниженому тиску. Але зменшенню тиску при звичайних формах характеристик відповідає збільшення подачі і збільшення потужності.

Крім того, при роботі приводного двигуна насоса в номінальному режимі, необхідно врахувати різницю їхніх швидкостей обертання. Для цього в рівняння насосів потрібно ввести коефіцієнт узгодження швидкості обертання  $k_y = n_{д.ном}/n_{н.ном}$ , який враховуватиме те, що робоче колесо насоса обертається з номінальною швидкістю двигуна.

Щоб знайти значення продуктивностей НА, які вони розвиватимуть при сприятливій сумісній роботі з МВ, потрібно розв'язати систему рівнянь (2.19), у якій використано такі позначення:  $m$  – кількість насосів першого типу;  $n$  – кількість насосів другого типу.

Отримаємо, що продуктивності, які розвивають насосні агрегати першого та другого типів, розраховуються за (2.20) і (2.21).

$$\begin{cases} H = k_{y1}^2 A_1 + B_1 k_{y1} Q_1 + C_1 Q_1^2; \\ H = k_{y2}^2 A_2 + B_2 k_{y2} Q_2 + C_2 Q_2^2; \\ H = H_c + R_c (m Q_1 + n Q_2)^2, \end{cases} \quad (2.19)$$

$$Q_1(Q) = \frac{1}{2C_1} \left( -k_{y1} B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 B_1^2 + 4C_1 H_c + 4C_1 R_c Q^2 - 4C_1 k_{y1}^2 A_1} \right), \quad (2.20)$$

$$Q_2(Q) = \frac{1}{2C_2} \left( -k_{y2} B_2 + \sqrt{k_{y2}^2 B_2^2 + 4C_2 H_c + 4C_2 R_c Q^2 - 4C_2 k_{y2}^2 A_2} \right). \quad (2.21)$$

Отримані продуктивності дозволяють встановити ККД НА при спільній роботі на МВ, та визначити ККД всієї системи. Таким чином, для забезпечення потрібного значення продуктивності необхідно увімкнути паралельно  $k = m + n$  НА. При цьому НА працюватимуть узгоджено з МВ, а продуктивність НС буде більшою або рівною потрібному значенню подачі.

Перевищення величини подачі НС призводить до збільшення витрат у трубопроводі та підвищення тиску в МВ, що проявляється у надлишковому споживанні ЕЕ та зменшенні надійності роботи системи водопостачання [13]. Тому врахуємо це перевищення в цільовій функції оптимізації складовою надлишкових витрат.

Оскільки надлишок води формується в результаті сумарної подачі всіх працюючих насосів, то коефіцієнт затрат енергії на перекачку одного кубометра води знайдемо як середнє значення з відповідних затрат кожного з НА

$$c_n = \frac{\sum_{i=1}^{m+n} \frac{c_i}{Q_i}}{m+n},$$

де  $Q_i$  – номінальне значення продуктивності  $i$ -го насоса в м/год.

Таким чином, задача визначення комбінацій ввімкнених НА для забезпечення змінних протягом доби потреб споживача у воді зводиться до пошуку таких послідовностей чисел  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , при яких забезпечується мінімум цільової функції

$$C(t) = \sum_{i=1}^n \left( a \cdot c_i + d \cdot Z_{\text{мех}_i} \cdot t_i(t) + e \cdot Z_{\text{ел}_i} \cdot N_{\text{п}_i}(t) \right) x_i(t) +$$

$$+ c_n [Q_{\text{реал}}(x_i) - Q_{\text{потр}}(t)] \rightarrow \min, \quad (2.22)$$

при виконанні обмежень:

– на сумарне значення продуктивності, яке має бути більшим або рівним потрібному і не повинно перевищувати значення  $Q_{\text{max}}$ , при якому можливі аварії в трубопроводі:

$$Q_{\text{потр}} \leq Q_{\text{реал}}(x_i) = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_i \leq Q_{\text{max}}; \quad (2.23)$$

– на забезпечення сумісної роботи з МВ:

$$\begin{cases} H = k_{y1}^2 A_1 + B_1 k_{y1} Q_1 + C_1 Q_1^2; \\ H = k_{y2}^2 A_2 + B_2 k_{y2} Q_2 + C_2 Q_2^2; \\ H = H_c + R_c (m Q_1 + n Q_2)^2; \end{cases} \quad (2.24)$$

– на змінні  $x$ :

$$x_i = 0 \vee 1, \text{ де } i = \overline{1, n-1}; \quad (2.25)$$

– на змінну  $x_5$ :

$$x_5 = 1. \quad (2.26)$$

Обмеження (2.26) необхідне для того, щоб забезпечити постійну роботу НА, продуктивність якого буде регулюватися.

Задача, яка описується виразами (2.22 – 2.26) є задачею математичного програмування лінійного типу [73, с. 5].

Розглянемо роботу п'яти НА станції водопостачання другого підйому, з трьома насосами першого типу та двома – другого типу (див. табл. А.3). Насоси приводяться в рух відповідними АД (див. табл. А.4). Величини електричного та механічного зносу вказаних установок розраховувалися в підрозд. 2.1. Потрібне значення продуктивності задається ступеневим графіком водопостачання, зображеним на рис. 2.2.

Для побудови напірно-витратних характеристик НА підставимо значення продуктивностей та відповідні їм значення тиску насоса першого та другого типу в рівняння (2.16) при номінальній швидкості обертання робочого колеса. Отримаємо систему трьох рівнянь з трьо-

ма невідомими, розв'язавши яку знайдемо коефіцієнти апроксимації шуканих характеристик. Отримаємо, що залежність  $H-Q$  характеристики насоса Д 2000–100 матиме вигляд

$$H(v, Q) = 51,662v^2 + 0,076vQ - 2,596 \cdot 10^{-5} Q^2, \quad (2.27)$$

а залежність  $H-Q$  характеристики насоса Д 1250–125 матиме вигляд

$$H(v, Q) = 139,2v^2 + 0,025vQ - 2,894 \cdot 10^{-5} Q^2. \quad (2.28)$$

При  $H_c = 80$ ,  $R_c = \frac{1}{3065445}$  отримаємо характеристику мережі

$$H = 80 + \frac{1}{3065445} Q^2. \quad (2.29)$$

Для НА першого та другого типів коефіцієнт узгодження дорівнюватиме

$$k_{y1} = 1,016, \quad k_{y2} = 1,021. \quad (2.30)$$

Для розрахунків задамося довільними значеннями тривалості безперервної роботи  $t_i$  та кількості реалізованих прямих пусків  $N_{\Pi}$  кожного з насосних агрегатів.

Методом спряжених градієнтів, використовуючи можливості комп'ютерної програми Mathcad, для кожної години доби знайдемо комбінації ввімкнених насосів, при яких забезпечуються мінімум цільової функції (2.22) та виконуються обмеження (2.23 – 2.26).

Результати оптимізації зведемо в табл. 2.2.

Оптимізація виконана в програмі Microsoft Office Excel з використанням функції «Поиск решения» за методом Ньютона дає такі ж самі результати, як і оптимізація, виконана в програмі Mathcad за методом спряжених градієнтів.

Вимоги до економії спожитої двигунами насосів енергії потребують зведення кількості НА, що працюють паралельно, до мінімуму. Крім того система насосів, що працюють паралельно, повинна забезпечувати потрібну продуктивність. В результаті розв'язання задачі оптимізації (2.22) з врахуванням умов (2.23 – 2.26) отримано такі кількості нерегульованих НА, що одночасно працюють, при яких забезпечується потрібне значення продуктивності  $Q_{\text{потр}}$  та працює найменша для кожної години кількість насосів.

Таблиця 2.2

## Комбінації ввімкнених НА при сумісній роботі на мережу водопостачання

		№ насоса	1	2	3	4	5		
		с, кВт/ГОД.	741,332	741,332	741,332	593,1	593,1		
		t, год	10000	5000	3000	1500	8000		
		Z <sub>мех</sub> , кВт/ГОД.	0,037	0,037	0,037	0,03	0,03		
		N <sub>п</sub> , шт	10	50	120	200	2		
		Z <sub>ел</sub> , кВт/ГОД.	211,285	211,285	211,285	162,635	162,635		
		x	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>		
Години доби	Q <sub>потр</sub> , м <sup>3</sup> /ГОД.							Q <sub>реал</sub> , м <sup>3</sup> /ГОД.	
0–1	4368	1	0	0	0	0	1	3250,00	
1–2	4602	1	0	0	0	0	1	3250,00	
2–3	3700	1	0	0	0	0	1	3250,00	
3–4	3894	1	0	0	0	0	1	3250,00	
4–5	4485	1	0	0	0	0	1	3250,00	
5–6	6000	1	1	0	0	0	1	5250,00	
6–7	6570	1	1	0	0	0	1	5250,00	
7–8	7320	1	1	1	0	0	1	7250,00	
8–9	7830	1	1	1	0	0	1	7250,00	
9–10	7120	1	1	1	0	0	1	7250,00	
10–11	6845	1	1	0	0	0	1	5250,00	
11–12	6175	1	1	0	0	0	1	5250,00	
12–13	6000	1	1	0	0	0	1	5250,00	
13–14	6000	1	1	0	0	0	1	5250,00	
14–15	6490	1	1	0	0	0	1	5250,00	
15–16	6375	1	1	0	0	0	1	5250,00	
16–17	6255	1	1	0	0	0	1	5250,00	
17–18	6690	1	1	0	0	0	1	5250,00	
18–19	6690	1	1	0	0	0	1	5250,00	
19–20	6690	1	1	0	0	0	1	5250,00	
20–21	6965	1	1	0	0	0	1	5250,00	
21–22	6650	1	1	0	0	0	1	5250,00	
22–23	6455	1	1	0	0	0	1	5250,00	
23–00	4602	1	0	0	0	0	1	3250,00	

В табл. 2.2 значення  $Q_{\text{реал}}$  розраховується як сума номінальних значень продуктивностей працюючих насосів. Столпчик  $Q_{\text{реал}}$  введено для того, щоб показати, що вибір НА, які працюють паралельно, повинен відбуватися обов'язково з врахуванням сумісної роботи агрега-

тів на МВ. В протилежному випадку кількість двигунів, що одночасно працюють, була б більшою, а, відповідно, збільшилося б і споживання ЕЕ.

Продуктивність та тиск НС при такому режимі роботи зображено на рис. 2.5.

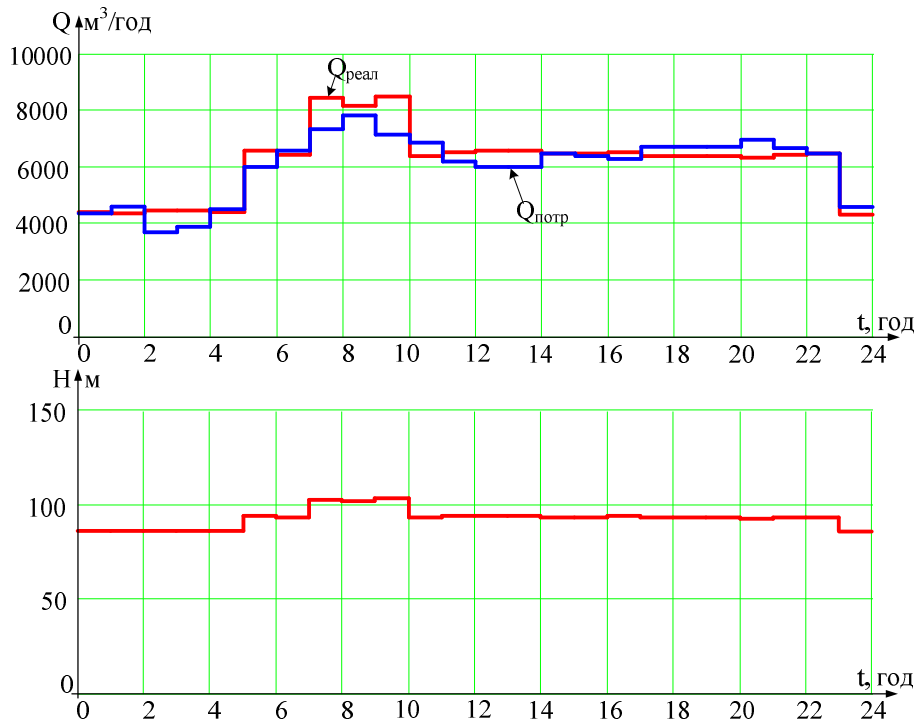


Рис. 2.5. Потрібне значення продуктивності  $Q_{\text{потр}}$ , дійсне значення продуктивності  $Q_{\text{реал}}$  та тиск  $H$  на виході НС (результати розрахунків)

Таким чином, дійсне значення продуктивності не відповідає потрібному, а тиск на виході станції коливається в межах  $86 \div 103$  м.

Розглянемо як змінюватиметься ККД НА протягом доби при такому режимі роботи.

Відомо, що потужність, яка підводиться до вала ВН, можна представити поліномом третього порядку [74, с. 184]

$$P = A_3 v^2 Q + B_3 v Q^2 + D_3 v^3,$$

де  $v = \omega / \omega_{\text{ном}}$  – відносна швидкість обертання робочого колеса насоса;  $A_3, B_3, D_3$  – коефіцієнти апроксимації, які залежать від конструктивних особливостей насоса [74, с. 184].

Підставивши в (2.1) значення тиску (2.16), отримаємо корисну потужність насоса

$$P_k = \frac{\rho g Q}{1000} (A_1 v^2 + B_1 v Q + C_1 Q^2) = \frac{\rho g}{1000} (A_1 v^2 Q + B_1 v Q^2 + C_1 Q^3).$$

Коефіцієнт корисної дії за означенням і відповідно до [74, с. 184] матиме вигляд

$$\eta = \frac{P_k}{P} = \frac{\rho g}{1000} \cdot \frac{A_1 v^2 Q + B_1 v Q^2 + C_1 Q^3}{A_3 v^2 Q + B_3 v Q^2 + D_3 v^3}.$$

Розв'язавши систему рівнянь характеристики потужності, яка споживається двигуном насоса першого типу (див. табл. А.3), отримаємо залежність потужності від продуктивності та швидкості обертання

$$P(v, Q) = 1032v^2 Q - 384,439v Q^2 + 248,757v^3.$$

Аналогічно для насоса другого типу

$$P(v, Q) = 2083v^2 Q - 2083v Q^2 + 100v^3.$$

Коефіцієнт корисної дії насоса першого типу

$$\eta = \frac{1000 \cdot 9,8}{1000} \cdot \frac{51,662v^2 Q + 272,899v Q^2 - 336,384Q^3}{1032v^2 Q - 384,439v Q^2 + 248,757v^3}, \quad (2.31)$$

а насосів другого типу

$$\eta = \frac{1000 \cdot 9,8}{1000} \cdot \frac{139,2v^2 Q + 90v Q^2 - 375Q^3}{2083v^2 Q - 2083v Q^2 + 100v^3}. \quad (2.32)$$

На рис. 2.6 показано залежності ККД насосів двох типів від продуктивності при номінальній швидкості обертання. Крім того, на графіки нанесені значення ККД з паспортних даних.

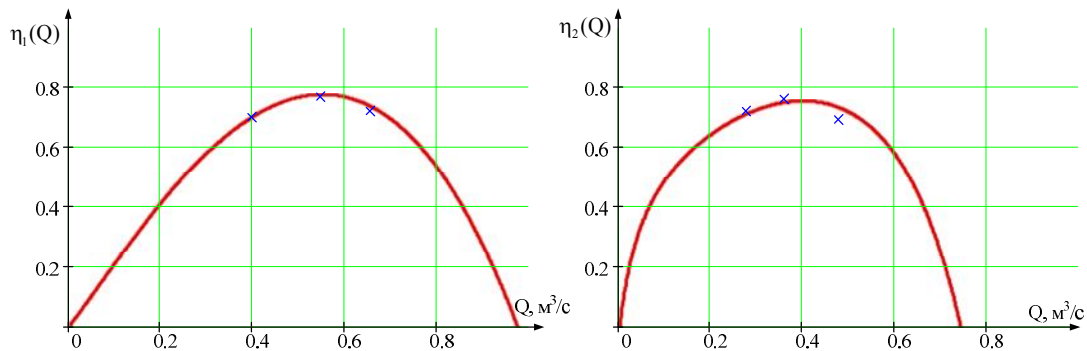


Рис. 2.6. ККД насосів першого  $\eta_1$  та другого  $\eta_2$  типів

З побудованих графіків видно, що отримані залежності проходять через або поблизу точок паспортних значень ККД.

Для того, щоб оцінити ефективність роботи кожного з НА в групі з іншими НА, потрібно підставити продуктивності, які вони розвиватимуть при сумісній роботі в вирази (2.31) та (2.32). Щоб знайти яку кількість ЕЕ споживатимуть двигуни насосів, потрібно знайти затрати енергії на подачу певного об'єму рідини кожного НА (2.2) з врахуванням ККД насоса та двигуна. Припустивши, сталість ККД двигуна, розрахуємо енергію, яку споживатимуть ввімкненні двигуни станції водопостачання. Отримані результати зведемо в табл. 2.3.

З таблиці видно, що при такому ввімкненні двигуни насосів споживатимуть більшу кількість енергії ніж при роботі в номінальному режимі.

Сумарне значення потужності, яку споживає станція протягом доби при регулюванні продуктивності зміною кількості працюючих НА показано на рис. 2.7.

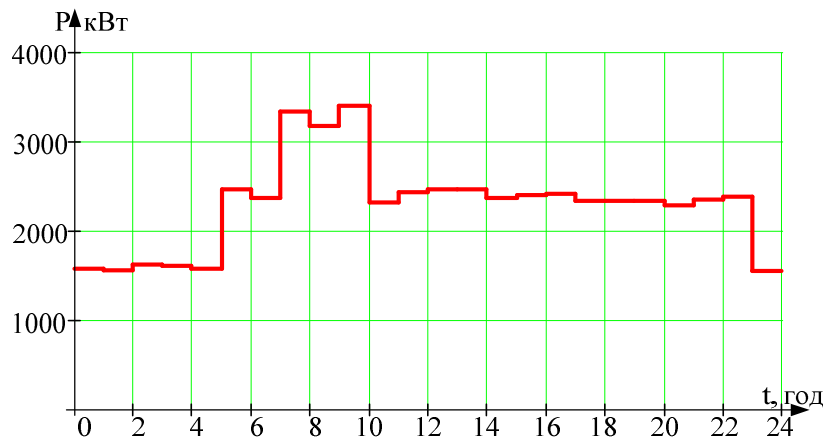


Рис. 2.7. Електрична потужність, яку споживає НС протягом доби

При цьому комбінації ввімкнених НА визначено з оптимізаційних розрахунків, враховуючи час безперервної роботи кожного НА, кількість реалізованих приводними двигунами прямих пусків.

Сумарне добове споживання групою НА, що працюють паралельно, в даних умовах становитиме

$$E_{const} = \sum_{i=0}^{23} \sum_{j=1}^5 E_{ij} = 5,502 \cdot 10^4 \text{ (кВт}\cdot\text{год.)}$$



Таблиця 2.3

## Спожита двигунами насосів електрична енергія

№ насоса	1	2	3	4	5
Е <sub>н</sub> , кВт·год.	Е <sub>1</sub> = 741,33	Е <sub>2</sub> = 741,33	Е <sub>3</sub> = 741,33	Е <sub>4</sub> = 593,1	Е <sub>5</sub> = 593,1
Години доби					
0–1	869,394	0	0	0	706,879
1–2	859,601	0	0	0	700,651
2–3	896,205	0	0	0	723,025
3–4	888,938	0	0	0	718,901
4–5	864,099	0	0	0	703,738
5–6	866,059	866,059	0	0	721,887
6–7	828,59	828,59	0	0	699,084
7–8	863,847	863,847	863,847	0	742,848
8–9	816,627	816,627	816,627	0	712,775
9–10	881,763	881,763	881,763	0	753,506
10–11	809,863	809,863	0	0	687,415
11–12	854,596	854,596	0	0	715,192
12–13	866,059	866,059	0	0	721,887
13–14	866,059	866,059	0	0	721,887
14–15	833,915	833,915	0	0	702,276
15–16	841,416	841,416	0	0	707,736
16–17	849,663	849,663	0	0	711,953
17–18	820,108	820,108	0	0	694,285
18–19	820,108	820,108	0	0	694,285
19–20	820,108	820,108	0	0	694,285
20–21	801,153	801,153	0	0	682,066
21–22	823,336	823,336	0	0	695,92
22–23	836,606	836,606	0	0	703,882
23–00	859,601	0	0	0	700,651

Таким чином, якщо для кожного потрібного значення продуктивності з графіка водопостачання вмикати отримані комбінації насосів, то за добу споживання станції становитиме 55,02 МВт·год. При цьому станція не забезпечує точне значення продуктивності. Це призводить до невиправданих затрат енергії на надлишковий тиск або до відсутності води в кінцевих ділянках трубопроводу. Для уникнення цього потрібно забезпечити точне регулювання продуктивності групи НА, що працюють паралельно.

### **2.3. Визначення законів керування електричними двигунами насосних агрегатів при забезпеченні точного значення продуктивності**

Питання зменшення споживання ЕЕ шляхом вибору оптимального числа ввімкнених НА станції розв'язується в працях [45] та [12; 46; 75]. При цьому відкритим залишається питання забезпечення точного значення продуктивності групи НА, що працюють паралельно. В підрозд. 2.1 монографії обґрунтовано використання регулювання одного НА при роботі з іншими нерегульованими. І, оскільки, найбільш ефективним з точки зору споживання ЕЕ є регулювання зміною частоти обертання робочого колеса насоса, то розглянемо роботу групи НА, один з яких регулюється зміною частоти напруги живлення двигуна.

Відповідно до [13, с. 52] для регульованих НА, які працюють в групі паралельно і мають різні характеристики, необхідно розподілити навантаження між ними та визначити області їх використання при ефективній роботі. Критерієм правильного розподілу навантаження між насосними агрегатами, як зазначається в [13, с. 52], є мінімум сумарних енергозатрат. Для насосів, криві потужності яких мають вигляд ввігнутих в низ кривих, мінімальне енергоспоживання групи агрегатів, що працюють паралельно, буде при рівності приростів потужності кожного з них. Такий спосіб підвищення ефективності роботи групи насосів, що працюють паралельно, дає до 5 % економії електроенергії [13, с. 53].

Вмілий вибір законів керування електроприводами НА станції водопостачання, при яких забезпечується потрібне значення її подачі та мінімальне споживання ЕЕ, є перспективним енергозберігаючим заходом з врахуванням цін на ЕЕ і воду, що постійно зростають, та дозволяє досягти економії ЕЕ – 30 % і води – 20 % [13].

Розглянемо більш загальну ситуацію, коли подачу забезпечують насоси різної потужності з різними характеристиками. Регулювання продуктивності у «великому» відбувається зміною кількості працюючих насосів, а у «малому» – зміною частоти обертання одного НА.

За відомої кількості ввімкнених НА потрібно забезпечити їх паралельну роботу при певному значенні сумарної продуктивності. Припустимо, що НС обладнана ВН з характеристиками, які мають максимум (більш загальний варіант, з якого легко отримати пологі напірно-

витратні характеристики). Вказані характеристики для ВН апроксимуються поліномом другого порядку (2.16) [72; 76].

Напірно-витратну характеристику МВ згідно з [75] представимо у вигляді (2.18).

Регулювання продуктивності станції в «малому» забезпечується зміною частоти обертання робочого колеса одного насоса за рахунок зміни частоти напруги живлення його привідного двигуна [77].

В цьому випадку спільна робота НА визначатиметься системою рівнянь (2.19) при доповненні її рівнянням насоса з регульованим приводом. Відомо, що при паралельній роботі в групі насосів різних потужностей, регулювати продуктивність слід насосом меншої потужності [13]. Тому в якості регульованого обираємо насос другого типу.

Сумісна робота НА при регулюванні продуктивності одного з них визначатиметься системою рівнянь

$$\begin{cases} H = k_{y1}^2 A_1 + B_1 k_{y1} Q_1 + C_1 Q_1^2; \\ H = k_{y2}^2 A_2 + B_2 k_{y2} Q_2 + C_2 Q_2^2; \\ H = A_2 v^2 + B_2 v Q_3 + C_2 Q_3^2; \\ H = H_c + R_c Q^2; \\ Q = m Q_1 + n Q_2 + Q_3. \end{cases} \quad (2.33)$$

де  $v$  – відносна швидкість обертання регульованого НА, в. од.;  $Q_3$  – продуктивність регульованого НА в м<sup>3</sup>/год.;  $m$  – кількість працюючих НА першого типу;  $n$  – кількість працюючих НА другого типу, без врахування регульованого НА.

Розв'язавши систему рівнянь (2.33), отримаємо такі значення продуктивностей всіх НА, при яких забезпечуються потреби споживача у воді та спільна робота НА на МВ:

- для НА першого типу

$$Q_1(Q) = \frac{1}{2C_1} \left( -k_{y1} B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 B_1^2 + 4C_1 H_c + 4C_1 R_c Q^2 - 4C_1 k_{y1}^2 A_1} \right);$$

- для нерегульованих НА другого типу

$$Q_2(Q) = \frac{1}{2C_2} \left( -k_{y2}B_2 + \sqrt{k_{y2}^2B_2^2 + 4C_2H_c + 4C_2R_cQ^2 - 4C_2k_{y2}^2A_2} \right);$$

– для регульованого НА

$$Q_3(Q, m, n) = Q - \frac{m}{2C_1} \left( -k_{y1}B_1 + \sqrt{k_{y1}^2B_1^2 + 4C_1H_c + 4C_1R_cQ^2 - 4C_1k_{y1}^2A_1} \right) - \frac{n}{2C_1} \left( -k_{y2}B_2 + \sqrt{k_{y2}^2B_2^2 + 4C_2H_c + 4C_2R_cQ^2 - 4C_2k_{y2}^2A_2} \right). \quad (2.34)$$

Для спрощення показання виразу відносної швидкості обертання введемо заміни

$$K_1(Q) = \sqrt{k_{y1}^2B_1^2 + 4C_1H_c + 4C_1R_cQ^2 - 4C_1k_{y1}^2A_1}, \quad (2.35)$$

$$K_2(Q) = \sqrt{k_{y2}^2B_2^2 + 4C_2H_c + 4C_2R_cQ^2 - 4C_2k_{y2}^2A_2}. \quad (2.36)$$

З врахуванням (2.35) та (2.36) відносна швидкість обертання регульованого НА при його сумісній роботі з іншими нерегульованими НА на МВ набуде вигляду

$$\begin{aligned} \nu(Q, m, n) = & \frac{1}{4C_1C_2A_2} \cdot \left( K_2(Q)B_2C_1n - B_2^2C_1nk_{y2} - 2B_2C_1QC_2 - mC_2k_{y1}B_1B_2 + \right. \\ & + mC_2K_1(Q)B_2 + \left( 4B_2^2C_1^2Q^2C_2^2 - 16C_2^3A_2m^2H_cC_1 + 16C_2^2A_2C_1^2R_cQ^2 - \right. \\ & - 16C_2^2A_2C_1^2n^2R_cQ^2 - 16C_2^3A_2C_1^2Q^2 - 16C_2^2A_2C_1^2n^2H_c + 16C_2^2A_2C_1^2H_c - \\ & - 16C_2^3A_2m^2R_cQ^2C_1 + 4m^2C_2^2B_2^2C_1H_c + 4m^2C_2^2B_2^2C_1R_cQ^2 + 4C_1^2n^2B_2^2C_2H_c + \\ & + 4C_1^2n^2B_2^2C_2R_cQ^2 - 4B_2^2C_1QC_2^2mK_1(Q) + 16C_2^3A_2mQC_1K_1(Q) + \\ & + 8C_2^3A_2m^2k_{y1}B_1K_1(Q) + 16C_2^3A_2m^2k_{y1}^2A_1C_1 + 2m^2C_2^2k_{y1}^2B_1^2B_2^2 + \\ & + 4B_2^2C_1QC_2^2mk_{y1}B_1 - 8C_2^3A_2m^2k_{y1}^2B_1^2 - 4m^2C_2^2B_2^2C_1k_{y1}^2A_1 + \\ & + 16C_2^2A_2C_1^2nQK_2(Q) - 2K_2(Q)B_2^3C_1^2n^2k_{y2} - 4K_2(Q)B_2^2C_1^2nQC_2 - \\ & - \left( -2K_2(Q)B_2^2C_1nmC_2k_{y1}B_1 - 2B_2^3C_1nk_{y2}mC_2K_1(Q) + 2K_2(Q)B_2^2C_1nmC_2K_1(Q) - \right. \\ & - 8C_2^2A_2nmC_1K_2(Q)K_1(Q) + 8C_2^2A_2nmC_1k_{y2}B_2K_1(Q) + 8C_2^2A_2nmC_1K_2(Q)k_{y1}B_1 + \\ & \left. + 8C_2A_2C_1^2n^2k_{y2}B_2K_2(Q) - 8C_2^2A_2nmC_1k_{y2}B_2k_{y1}B_1 - 16C_2^2A_2C_1^2nQk_{y2}B_2 + \right. \end{aligned}$$

$$+2B_2^3 C_1 n k_{y2} m C_2 k_{y1} B_1 + 4B_2^3 C_1^2 n k_{y2} Q C_2 + 2B_2^4 C_1^2 n^2 k_{y2}^2 - 16C_2^3 A_2 m Q C_1 k_{y1} B_1 - \\ - 2m^2 C_2^2 K_1(Q) B_2^2 k_{y1} B_1 + 16C_2^2 A_2^2 C_1^2 n^2 k_{y2}^2 - 12C_1^2 n^2 B_2^2 C_2 k_{y2}^2 A_2 \Big)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.37)$$

Отримане значення відносної швидкості обертання дозволяє забезпечити потрібну подачу станції  $Q$  для певної кількості увімкнених НА, а отримані значення продуктивності НА дозволяють оцінити затрати енергії на забезпечення вказаного режиму роботи.

На рис. 2.8 показано відносні швидкості обертання  $v$ , продуктивність  $Q_3$ , регульованого НА для забезпечення подачі насосної станції другого підйому м. Вінниці по графіку водопостачання, показаному на рис. 2.2.

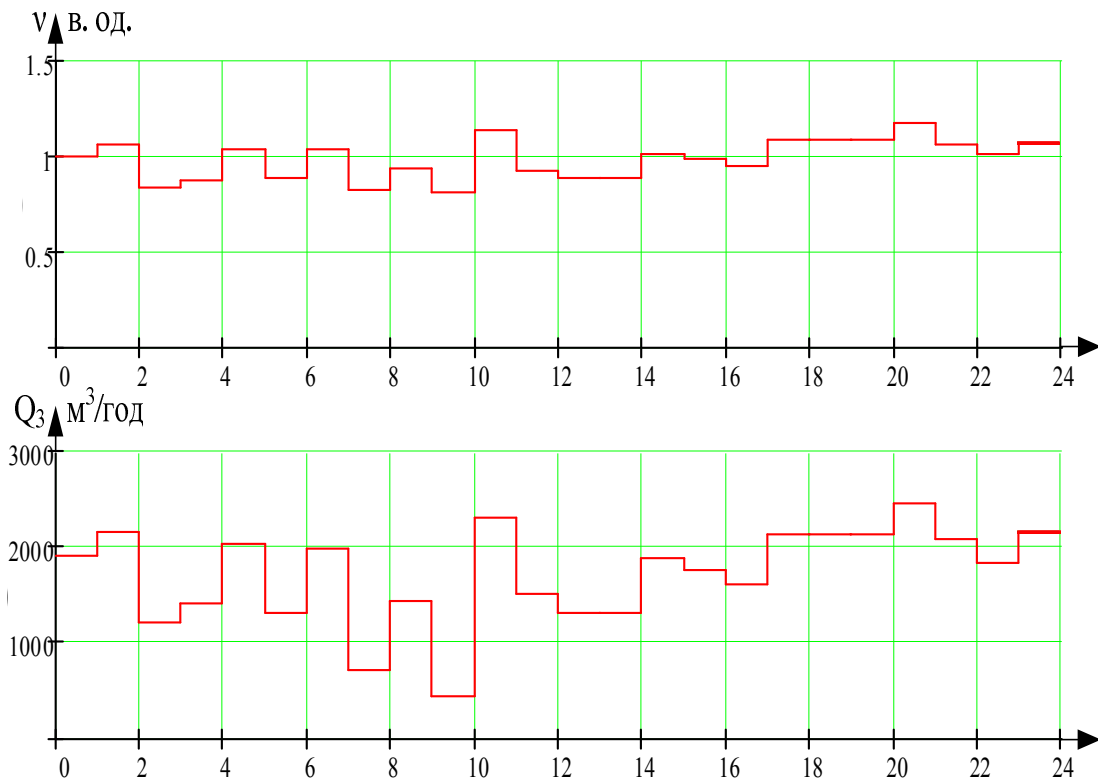


Рис. 2.8. Відносна швидкість обертання двигуна регульованого НА ( $v$ ) та його продуктивність ( $Q_3$ ) для НС другого підйому м. Вінниці

Для НС з трьома НА першого типу та двома НА другого типу отримані значення продуктивностей нерегульованих НА набудуть виглядів, зображених на рис. 2.9.

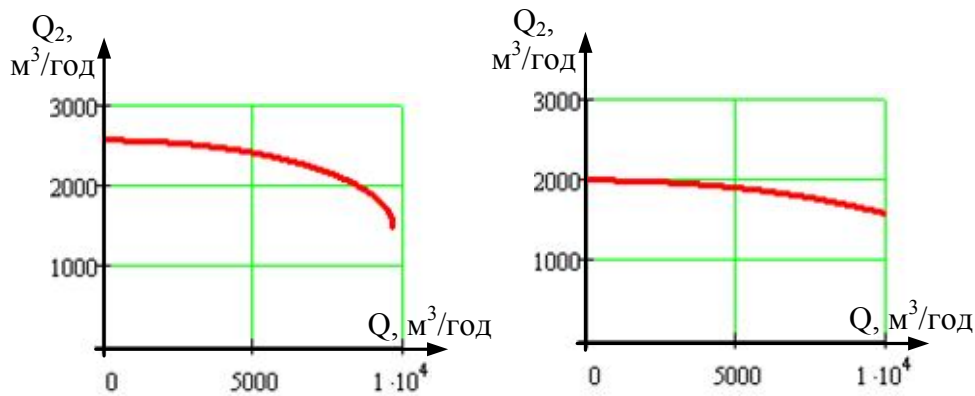


Рис. 2.9. Продуктивність НА першого  $Q_1$  та другого  $Q_2$  типів при роботі на МВ

З рисунків бачимо, що при паралельній роботі НА двох типів, НА першого типу до значення загальної продуктивності  $8585 \text{ м}^3/\text{год.}$  працює з продуктивністю більшою за номінальну. Перевищення продуктивності найбільше при малих значеннях подачі, сягає  $2578 \text{ м}^3/\text{год.}$  (129 % від номінальної) і поступово зменшується при зростанні подачі.

НА другого типу (меншої потужності) працює з підвищеною продуктивністю постійно. Найбільше значення перевищення продуктивності має місце також при малих значеннях подачі, і становить  $2003 \text{ м}^3/\text{год.}$  (160,2 % від номінальної) і також поступово зменшується при зростанні подачі.

Подача та швидкість обертання регульованого НА залежать від потрібного значення сумарної продуктивності та кількості працюючих НА. Розглянемо три можливі комбінації ввімкнення НА (див. табл. 2.3):

- регульований НА та один нерегульований;
- регульований НА та два нерегульованих;
- регульований НА та три нерегульованих.

При цьому продуктивність та швидкість обертання регульованого НА матимуть ступеневий характер. Кожна ступінь відповідатиме певній кількості працюючих нерегульованих НА.

Представимо названі залежності для НС другого підйому м. Вінниці при різних кількостях працюючих НА в одній системі координат. На рис. 2.10 зображено залежність відносної швидкості обертання двигуна регульованого НА, а на рис. 2.11 – продуктивності регульованого НА.

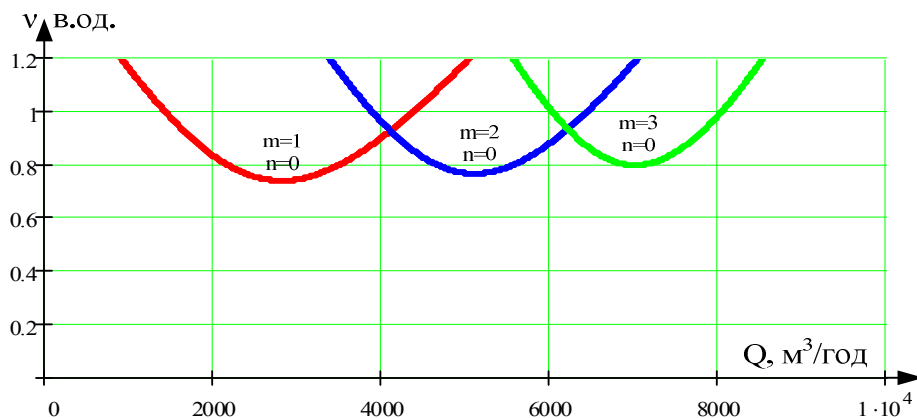


Рис. 2.10. Відносна швидкість обертання двигуна регульованого НА

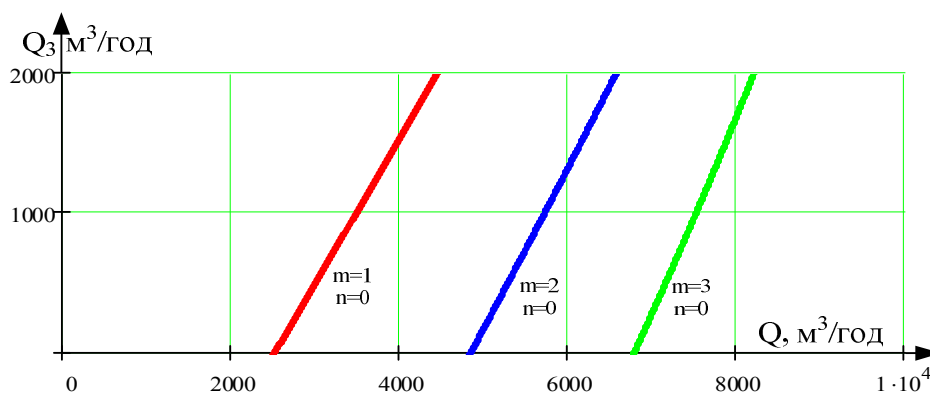


Рис. 2.11. Продуктивність регульованого НА при його сумісній роботі з нерегульованими НА на МВ

Слід відмітити, що при роботі з продуктивністю 0,3–0,5 від номінального значення [20, с. 153] підвищується вібрація насоса, виникають нестационарні осьові та радіальні сили, що негативно проявляється на опорних та ущільнюючих вузлах насоса, для насосів з наявною зростаючою частиною характеристики виникає явище помпажу. Оптимальною зоною роботи НА вважається його робота з продуктивністю 0,7–1,2 від оптимального значення [20, с. 153].

При сумісній роботі нерегульовані НА працюють з перевищеними значеннями продуктивності. Продуктивність регульованого НА змінюється майже лінійно по відношенню до потрібного значення продуктивності  $Q$ . З рисунків видно, що зі збільшенням кількості працюючих насосів зменшується діапазон зміни швидкості регульованого НА.

Отже, в результаті теоретичних досліджень системи подачі води в МВ, яка містить декілька НА, один з яких регулюється за частотою обертання, отримано закон зміни швидкості обертання двигуна регульованого НА, дотримання якого дозволить забезпечити точне зна-

чення продуктивності групи насосів, що працюють паралельно.

Отримані значення подачі НА дозволяють оцінити затрати енергії на забезпечення роботи в такому режимі. Знайшовши продуктивності та швидкості обертання регульованого НА за формулою (2.32) обрахуємо його ККД протягом доби. Підставивши ці значення разом з продуктивностями та тиском в (2.2) знайдемо потужності, які споживатимуться регульованим приводом насоса кожної години. При розрахунках введемо припущення про сталість ККД двигуна. Додавши споживану потужність всіма електричними двигунами ввімкнених насосів, можна отримати сумарну потужність, яку споживає станція протягом доби при регулюванні продуктивності зміною кількості працюючих НА та подачі одного з них. Цю потужність, а також потужність, яка споживається всіма двигунами при зміні їх кількості (див. рис. 2.7), показано на рис. 2.12.

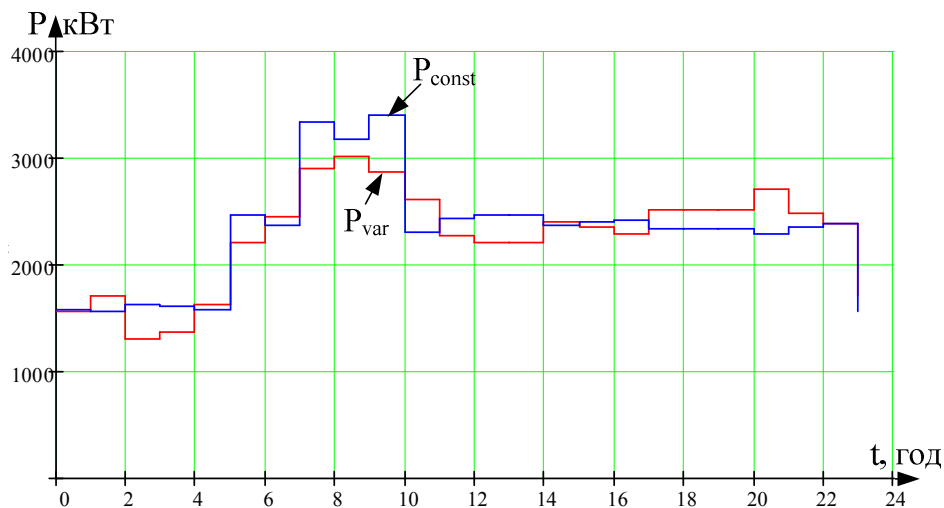


Рис. 2.12. Сумарна потужність, яку споживають двигуни НС другого підйому м. Вінниці (результати розрахунків)

На рис. 2.12 використано такі позначення:  $P_{var}$  — потужність, яка споживається двигунами НС при регулюванні швидкості обертання одного з них;  $P_{const}$  — потужність, яка споживається двигунами НС при зміні кількості працюючих насосів.

Просумувавши отримані значення потужності та помноживши на час, знаходимо кількість ЕЕ, яку споживають двигуни НС протягом доби:



$$E_{\text{var}} = \sum_{i=0}^{23} \sum_{j=1}^5 E_{ij} = 5,399 \cdot 10^4 \text{ (кВт}\cdot\text{добу)}.$$

Різниця між варіантом, коли регулювання відбувається тільки зміною кількості працюючих двигунів становитиме:

$$E_{\text{const}} - E_{\text{var}} = 5,502 \cdot 10^4 - 5,399 \cdot 10^4 = 1,01 \cdot 10^3 \text{ (кВт}\cdot\text{добу)}.$$

Тобто, при застосуванні регульованого ЕП для одного НА можна зменшити споживання енергії групою кількох НА під час регулювання продуктивності станції. Для НС другого підйому м. Вінниці споживання енергії можна зменшити на 1,01 МВт·добу.

Запропонований підхід можна застосувати до НС, яка має різні за характеристиками НА і до НС з різною кількістю працюючих НА.

Таким чином, потрібне значення величини подачі води НС забезпечується певною кількістю ввімкнених НА, з яких  $m+n$  нерегульованих та один регульований. Регулювання відбувається зміною частоти обертання робочого колеса насоса меншої потужності і сприяє сумісній роботі НА. Забезпечуючи зміну швидкості обертання двигуна регульованого НА відповідно до закону (2.37), відбувається підтримання на його виході такого тиску та продуктивності, при яких нерегульовані НА працюють узгоджено.

Не вирішеним залишається питання визначення моментів ввімкнення чи вимкнення двигуна нерегульованого НА.

#### **2.4. Визначення моментів ввімкнення чи вимкнення двигунів нерегульованих насосних агрегатів**

Відповідно до [13, с. 52] при керуванні різнотипними НА, необхідно визначити моменти зміни їх кількості. В [78] обґрунтовується в якості моментів переходу до іншої кількості працюючих агрегатів обирати точки перетину кривих їх питомих витрат. Для визначення останніх потрібно володіти інформацією про продуктивність, тиск та ККД регульованого насоса. Побудуємо названі залежності від потрібного значення продуктивності станції в одній системі абсцис.

Для визначення залежності ККД насоса від потрібного значення продуктивності станції, значення відносної швидкості обертання

(2.37) та продуктивності регульованого НА (2.34) підставимо в вираз його ККД (2.32). Представимо ці залежності для НС другого підйому м. Вінниці на рис. 2.13.

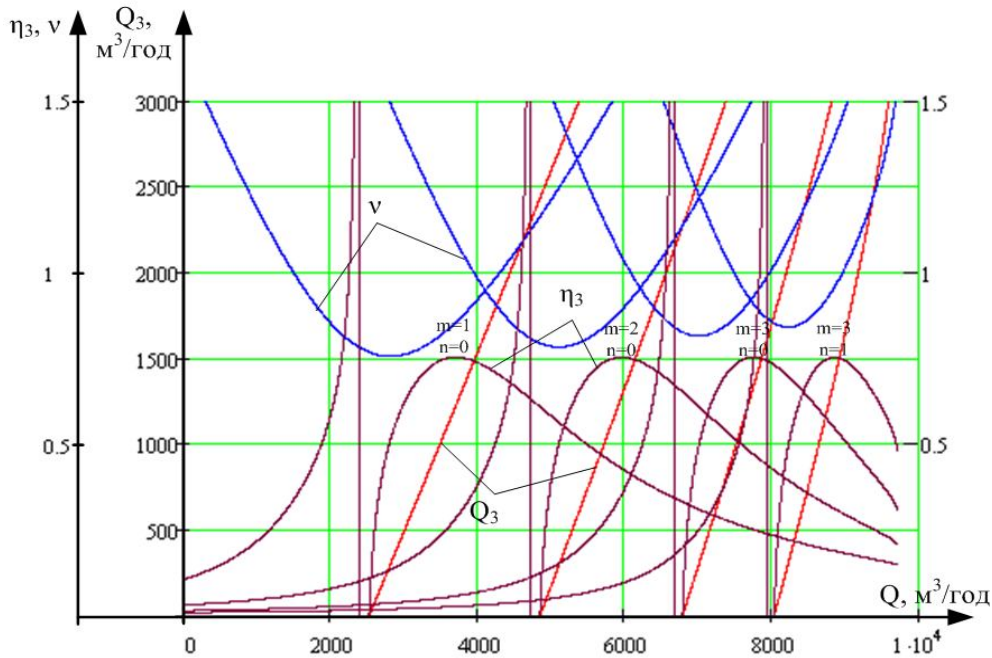


Рис. 2.13. Залежності продуктивності  $Q_3$ , відносної швидкості обертання  $v$  та ККД  $\eta_3$  регульованого НА від потрібного значення подачі при сумісній роботі НА станції другого підйому м. Вінниці на МВ

З графіків можна зробити такі висновки: на робочій частині характеристики ККД має майже лінійну форму на відміну від нерегульованих (див. рис. 2.6); робоча ділянка характеристики зменшується зі збільшенням кількості насосів, що працюють паралельно, і приймає крутішу форму.

Отримані графіки дозволяють робити висновки про те, як на роботу НА впливає ввімкнення чи вимкнення нерегульованого насоса.

Припустимо, що перемикання нерегульованих НА відбувається по швидкості обертання регульованого [79]. Тобто, коли швидкість обертання робочого колеса насоса досягає номінального значення, відбувається зміна кількості працюючих насосів. При цьому характеристики швидкості  $v$ , ККД  $\eta$  та продуктивності  $Q_3$  регульованого НА матимуть вигляд, зображений на рис. 2.14.

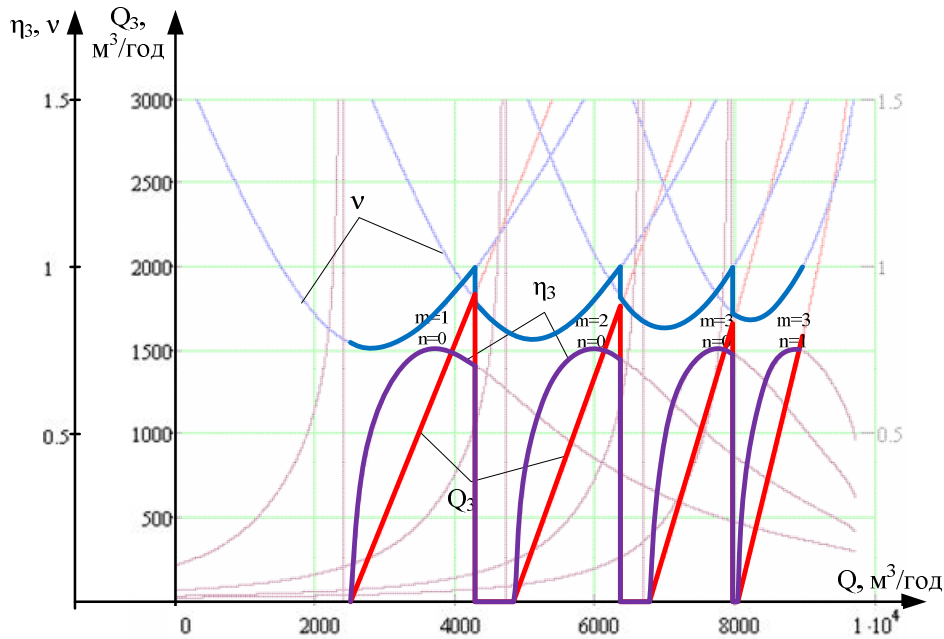


Рис. 2.14. Характеристики регульованого НА при керуванні по швидкості обертання

З отриманих характеристик бачимо, що продуктивність регульованого агрегата не перевищує 1853 м<sup>3</sup>/год. (148% від номінального значення) і зменшується зі збільшенням кількості працюючих насосів. При паралельній роботі регульованого агрегата з нерегульованими виникають моменти зворотного потоку рідини через насос і оскільки кожен з НА оснащений на своєму виході зворотним клапаном, то це приводить до його спрацювання. Спрацювання зворотного клапана приводить до виникнення гідравлічних ударів в мережі і є небажаним в процесі нормальної експлуатації.

Розглянемо випадок, коли перемикання кількості працюючих НА відбувається в моменти рівності нулю продуктивності регульованого НА. Характеристики швидкості  $v$ , ККД  $\eta$  та продуктивності  $Q_3$  при цьому матимуть вигляд, зображений на рис. 2.15.

З рисунку видно, що регульований НА працює з перевищеним значенням продуктивності. Найбільше значення продуктивності має місце при паралельній роботі з НА першого типу і сягає 2432 м<sup>3</sup>/год. (195 % від номінального значення). Під час роботи відсутні ділянки спрацювання зворотного клапана. Порівняно з попереднім випадком регульований НА споживає більшу кількість ЕЕ, оскільки перемикання відбувається (див. рис. 2.15) правіше ніж на рис. 2.14, що для всіх

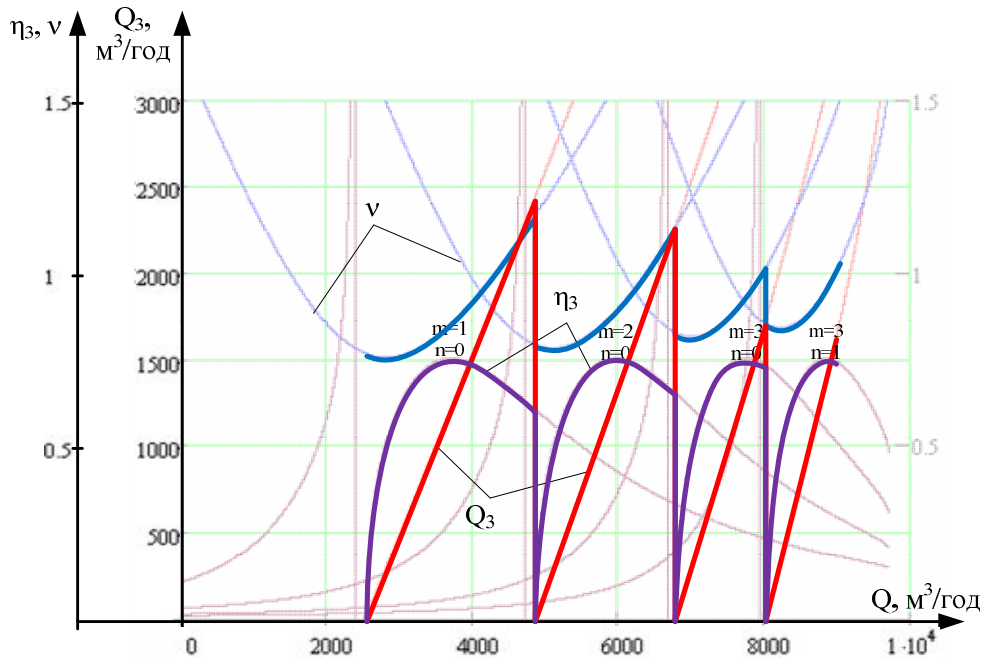


Рис. 2.15. Характеристики регульованого НА при керуванні по продуктивності

кількостей працюючих НА відповідає роботі з меншими значеннями ККД. Але, якщо цей режим роботи порівняти з попереднім, то на його перевагу вказує робота без гідравлічних ударів через спрацювання зворотного клапана. Крім того, розв'язки системи рівнянь (2.16) не враховують односторонню роботу насосів, тобто випадку спрацювання зворотного клапана. А тому при регулюванні по швидкості регульованого НА (див. рис. 2.15) точно невідомо, як поведе себе система при ввімкненні чи вимкненні наступного НА.

Перемикання кількості працюючих насосів можна проводити і в інші моменти, наприклад, у моменти рівності значень відносної швидкості обертання, в моменти виходу за робочу частину характеристики, в момент досягнення номінального значення продуктивності тощо. В усіх цих випадках та у випадку зображеному на рис. 2.15 регульований НА споживатиме меншу кількість енергії, ніж у випадку, показаному на рис. 2.18, але не можна точно сказати як поведе себе система (можливі явища помпажу) і обов'язково виникатимуть гідравлічні удари від спрацювання зворотного клапана. В трубопроводному транспорті, а особливо коли мова йде про міську водопровідну мережу, велика увага науковців та інженерів зосереджена на забезпеченні сумісної роботи НА з МВ та зменшенні кількості гідравлічних ударів. Перше призводить до неефективної роботи НА, роботи в областях низь-

ких ККД насоса, друге до аварій в трубопроводі. Тому виявляється доцільним варіант перемикання кількості працюючих насосів, показаний на рис. 2.15.

Таким чином, для випадку роботи в групі різнотипних нерегульованих НА одного регульованого, моментами зміни кількості працюючих насосів будуть точки рівності продуктивності регульованого НА нулю.

Тобто, розв'язавши систему рівнянь

$$Q_3(Q) = 0 \Rightarrow Q_{step}(m, n), \quad (2.38)$$

знаходимо значення продуктивностей  $Q_{step}$  при яких слід змінювати кількість насосів, що працюють паралельно. Для варіанта паралельної роботи на МВ (2.29) м. Вінниці трьох НА першого типу з характеристиками (2.27) та двох НА другого типу з характеристиками (2.28), один з яких регульований, моментами перемикання кількості насосів будуть  $Q_{step}(0,0) = 0$  м<sup>3</sup>/год.,  $Q_{step}(1,0) = 2540$  м<sup>3</sup>/год.,  $Q_{step}(2,0) = 4864$  м<sup>3</sup>/год.,  $Q_{step}(3,0) = 6802$  м<sup>3</sup>/год.

## 2.5. Розробка методу оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання

За результатами, отриманими в розділі, розробимо метод оптимізації роботи ЕП НС водопостачання. Він об'єднує кілька підходів, а саме: вибір в якості способу регулювання продуктивності групи насосів, що працюють паралельно, зміну їх кількості з регулюванням швидкості обертання одного з них; підхід до визначення комбінацій ввімкнених НА з точки зору мінімального споживання двигунами ЕЕ, тривалості безперервної роботи та кількості реалізованих двигунами прямих пусків; підхід до забезпечення плавного регулювання продуктивності групи насосів шляхом зміни швидкості обертання двигуна регульованого НА за певним законом; підхід до визначення моментів зміни кількості працюючих насосів.

Таким чином метод оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання полягає в тому, що для забезпечення потрібного значення продуктивності НС, яка складається з певної кількості НА, що працюють паралельно, серед яких можуть бути різнотипні,

потрібно використати зміну кількості працюючих насосів та регулювання продуктивності одного з них. Найкращий ефект дає спосіб, коли регулювання продуктивності насоса забезпечується зміною швидкості обертання його робочого колеса за рахунок зміни частоти напруги живлення приводного двигуна. В якості регульованого потрібно обрати агрегат з приводом від двигуна меншої потужності.

Кількість працюючих насосів, яка забезпечує не менше ніж потрібне значення продуктивності, визначається з оптимізаційних розрахунків (цільова функція (2.6)), враховуючи сумісну роботу насосів, питомі витрати енергії на роботу двигуна насоса, тривалість його безперервної роботи, кількість реалізованих прямих пусків двигуна, відхилення продуктивності від потрібного значення. Отримані комбінації повинні бути такими, щоб не виникало ситуацій коли НА вмикається на одну годину роботи і вимикається. Для цього необхідно виконати перерахунок, доповнивши задачу оптимізації обмеженням на роботу агрегата у цій ситуації. Сумісна робота насосів забезпечується розв'язанням системи рівнянь напірно-витратних характеристик насосів, що працюють в групі (2.16), та МВ (2.18). При цьому слід врахувати різницю між номінальними швидкостями обертання приводного двигуна та насоса (коефіцієнт узгодження  $k_y$  (2.30)) кожного агрегата.

Закон, за яким повинна змінюватися швидкість обертання двигуна регульованого НА, визначається з умови сумісної роботи на МВ  $m$  НА одного типу,  $n$  – другого та одного регульованого. Розв'язується система рівнянь (2.33) та знаходяться залежності швидкості обертання регульованого НА (2.37) та його продуктивності (2.34) від сумарної продуктивності станції та кількості працюючих нерегульованих НА.

З умови рівності продуктивності регульованого НА нулю (умова (2.38)) визначаються порогові значення сумарної продуктивності станції  $Q_{step}$ , при яких доцільно переходити на іншу кількість працюючих насосів.

Для випадку, який розглядається у монографії, коли потрібне значення продуктивності, яке диктується графіком водопостачання, зображеним на рис. 2.2, забезпечується паралельною роботою трьох НА з приводом від двигунів потужністю 800 кВт та двох НА з приводом від двигунів потужністю 630 кВт, закони керування регульованим НА матимуть вигляд:

$$v(Q, m, n) = \begin{cases} v(Q, 0, 0) \text{ при } Q_{step}(Q, 0, 0) \leq Q < Q_{step}(Q, 1, 0); \\ v(Q, 1, 0) \text{ при } Q_{step}(Q, 1, 0) \leq Q < Q_{step}(Q, 2, 0); \\ v(Q, 2, 0) \text{ при } Q_{step}(Q, 2, 0) \leq Q < Q_{step}(Q, 3, 0); \\ v(Q, 3, 0) \text{ при } Q_{step}(Q, 3, 0) \leq Q. \end{cases} \quad (2.39)$$

Таким чином, керування НА станції другого підйому м. Вінниці, відповідно до розробленого методу, відбуватиметься таким чином. Припустимо, що вимкнені всі НА. О 6-й годині (див. рис. 2.2) потрібно забезпечити подачу станції, рівну  $6570 \text{ м}^3/\text{год}$ . Для цього, відповідно до моментів перемикання кількості працюючих насосів знаходимо, що потрібно ввімкнути перший, другий, та п'ятий НА. П'ятий НА вводиться в роботу за законом (2.37) при  $m = 2, n = 0$  і встановлюється потрібне значення швидкості обертання, рівне  $v(6570, 2, 0) = 1,036$ . О 7-й годині швидкість обертання потрібно довести до значення  $v(Q_{step}(Q, 3, 0), 2, 0) = 1,113$  і ввімкнути третій по порядку НА. При ввімкненні третього насоса швидкість обертання регульованого необхідно зменшити до значення  $v(Q_{step}(Q, 3, 0), 3, 1) = 0,81$  і за законом (2.37) при  $m = 3, n = 0$  довести до значення  $v(7320, 3, 0) = 0,818$ , що відповідає роботі НС з подачею  $7320 \text{ м}^3/\text{год}$ . Кожне ввімкнення НА відбувається аналогічним чином. При вимкненні процедура виконується в протилежному напрямі, а саме: спочатку зменшують швидкість обертання за законом керування для цієї комбінації ввімкнених НА до попереднього значення  $Q_{step}$ , далі виконують вимкнення зі збільшенням швидкості обертання регульованого до відповідного значення за законом керування для попередньої комбінації ввімкнення і довести швидкість до відповідної потрібному значенню подачі.

Таким чином, для забезпечення потрібного значення продуктивності, використовуючи розроблений метод, отримано комбінації ввімкнених НА та закони керування швидкістю обертання двигуна регульованого НА (2.39), при виконанні яких забезпечується зменшення споживання двигунами насосів ЕЕ.

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЬ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ НА МЕРЕЖУ СПОЖИВАЧА

### 3.1. Модель відцентрового насоса

ВН – це механічний перетворювальний пристрій, призначений для перетворення швидкості обертання робочого органу (робочого колеса) у кількість рідини на його виході.

Рівняння насоса, яке пов'язує тиск на його виході з продуктивністю та відносною швидкістю обертання робочого колеса, може мати вигляд (2.16) для насосів,  $H-Q$  характеристика яких має максимум та (2.17) – для насосів з пологими характеристиками.

Розглянемо ВН, який описується  $H-Q$  характеристикою, що має максимум. Розв'язавши (2.16) як рівняння з незалежною змінною  $Q$ , отримаємо

$$Q_{1,2}(v, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_1 v \pm \sqrt{B_1^2 v^2 + 4C_1 H - 4C_1 A_1 v^2}}{C_1}. \quad (3.1)$$

При цьому, знак «мінус» у виразі (3.1) відповідає спадній частині  $H-Q$  характеристики, а «плюс» – її зростаючій частині. Оскільки при моделюванні насоса розглядатиметься робоча ділянка його  $H-Q$  характеристики, яка розміщена на спадній частині, то надалі розглядатимемо вираз для знаходження продуктивності відцентрового насоса

$$Q(v, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_1 v - \sqrt{B_1^2 v^2 + 4C_1 H - 4C_1 A_1 v^2}}{C_1}. \quad (3.2)$$

Існує підхід, до показання залежності між тиском на виході насоса та його продуктивністю передаточною функцією у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [80; 81]. На вхід передаточної функції при цьому подається різниця значень тиску, що розвиває насос та тиску МВ і на виході отримуємо продуктивність насоса. На нашу думку такий підхід помилковий, якщо розглядати сам насос, оскільки при обертанні робочого колеса з певною швидкістю на його виході спершу з'являється відповідне їй значення продуктивності. Вже потім, в зале-



жності від параметрів МВ (якщо насос працює на мережу з протитиском) та параметрів насосів, що працюють паралельно (якщо такі є), утворюється тиск на виході насоса. А далі, в залежності від тиску насоса та протитиску, формується продуктивність, яка генерується в мережу насосом. Тому можна вважати, що тиск розвивається насосом з певною затримкою часу по відношенню до подачі. Причому це значення тиску визначатиметься параметрами самого насоса, насосів, які з ним працюють та МВ.

Розглянемо сам ВН без мережі. Побудуємо структурну схему механізму, якщо на вхід подається відносно значення швидкості обертання робочого колеса насоса, а на виході отримуємо його продуктивність (рис. 3.1).

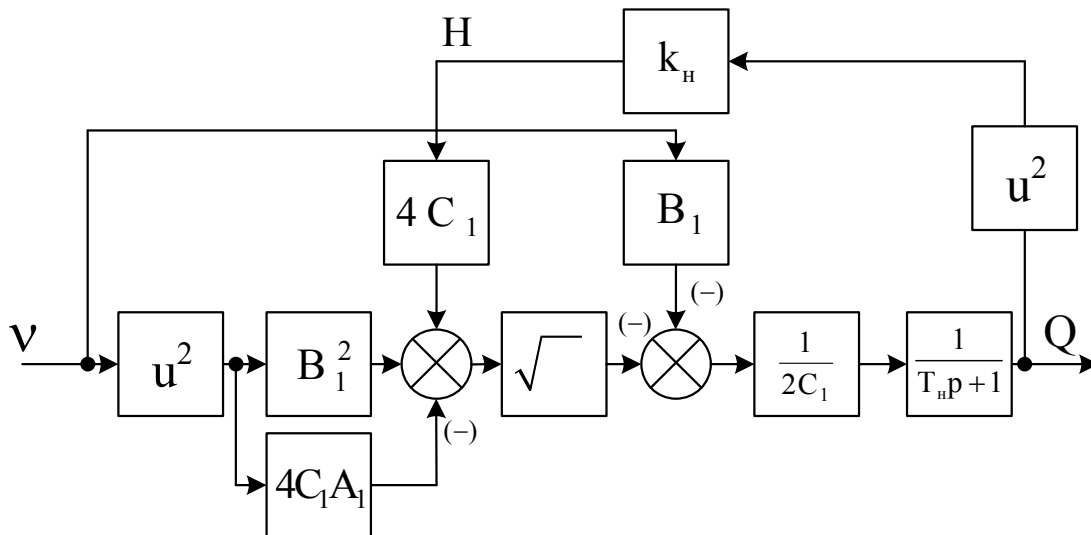


Рис. 3.1. Модель відцентрового насоса з  $H-Q$  характеристикою, яка має максимум

Відомо, що кількість рідини, яка витікає з отвору, пропорційна кореню квадратному із значення тиску в перерізі [13, с. 43]

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}},$$

де  $Q_1, Q_2$  – кількість рідини в перший та другий момент часу;  $H_1, H_2$  – відповідні значення тиску в перший та другий моменти часу.

Припустивши, що  $Q_2 = Q_n$ , а відповідний їй тиск  $H_2 = H_n$ , де  $Q_n$  та  $H_n$  – номінальні значення подачі та тиску насоса, отримаємо вираз для знаходження тиску насоса в будь-який момент часу

$$Q = Q_H \sqrt{\frac{H}{H_H}} \Rightarrow H = \frac{H_H}{Q_H^2} Q^2.$$

Звідки можна знайти коефіцієнт пропорційності  $k_H$

$$k_H = \frac{H_H}{Q_H^2}.$$

У додатку Д показано розрахунок сталих часу насосів, які використовуються на НС другого підйому м. Вінниці.

Постійна часу насоса першого типу дорівнює  $T_{H1} = 0,12$  (с); постійна часу насоса другого типу дорівнює  $T_{H2} = 0,07$  (с).

Побудуємо модель насоса першого типу у пакеті прикладних програм (ППП) Matlab. Вигляд моделі, зібраної в Simulink Release 12 показано на рис. 3.2.

Подавши на вхід системи сигнал відносної швидкості обертання у вигляді стрибка (рис. 3.3), отримаємо перехідні процеси тиску  $H$  та продуктивності  $Q$ .

Якщо швидкість на вході моделі насоса буде змінюватися плавно наростаючи до значення 1, то тривалість перехідного процесу при цьому буде збільшуватися.

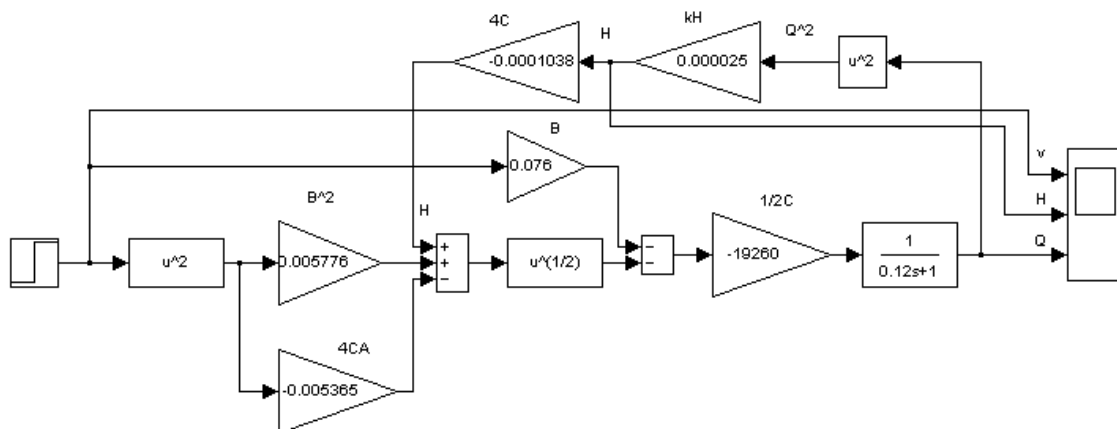


Рис. 3.2. Вигляд моделі відцентрового насоса першого типу, зібраної в Simulink ППП Matlab Release 14

Запропонована модель представляє залежність продуктивності  $VH$  з напірно-витратною характеристикою, яка має максимум, від швидкості обертання робочого колеса та його гідравлічних параметрів при роботі на мережу без протитиску.

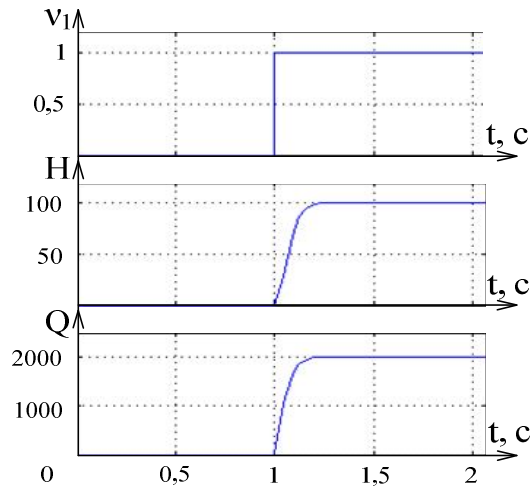


Рис. 3.3. Відносна швидкість обертання  $v$ , тиск  $H$  та продуктивність  $Q$  насоса першого типу

### 3.2. Модель системи перетворювач частоти–асинхронний двигун

У додатку Е наведено математичну модель АД відносно поточкозчеплень в ортогональній системі координат.

Вирази для напруги живлення в проекціях на осі  $\alpha$ – $\beta$  запишемо у вигляді [82, с. 135; 83]:

$$U_{\alpha s} = \sqrt{2}U_{1.\text{ном}} \cos(2\pi f_1 t),$$

$$U_{\beta s} = \sqrt{2}U_{1.\text{ном}} \sin(2\pi f_1 t),$$

де  $f_1$ – частота обертання поля статора двигуна.

На рис. 3.4 показана комп’ютерна модель АД першого типу, зібрана в ППП Matlab Simulink.

На вхід моделі подається рівномірно наростаючий сигнал часу  $t$ , сигнал запуску “zap” та момент навантаження  $M_c$ . На виході отримуємо швидкість обертання двигуна  $\omega$  (рад/с), електромагнітний момент  $M$  (Нм), струм фази А обмотки статора та споживана двигуном активна потужність  $P$ .

Потужність, яку двигун споживає з мережі, розраховується за формулою

$$P = 3U_{\phi} I \cos\varphi = 3U_{\phi} (I_{\alpha s} \cos(2\pi f_1 t) - I_{\alpha s} \sin(2\pi f_1 t)) \cos\varphi,$$

де  $U_{\phi}$  – фазне значення напруги живлення обмотки статора двигуна, В;  $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності двигуна.

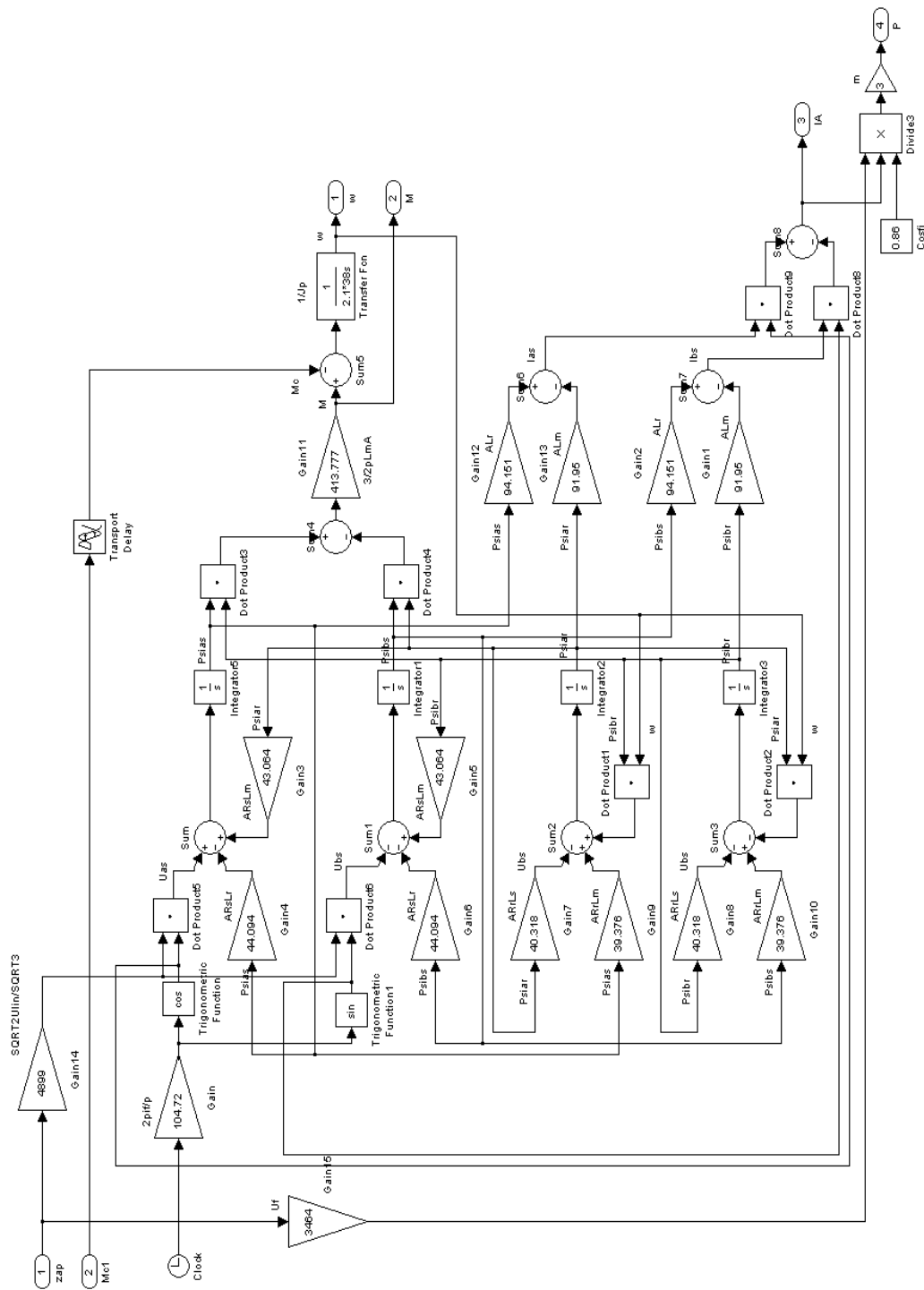


Рис. 3.4. Модель АД первого типу, зібрана в ППП Matlab Simulink

В якості моменту інерції  $J$  прийнято суму моментів інерції ротора двигуна та робочого колеса насоса.

Графіки швидкості та моменту двигуна першого типу при запуску без навантаження показані на рис. 3.5.

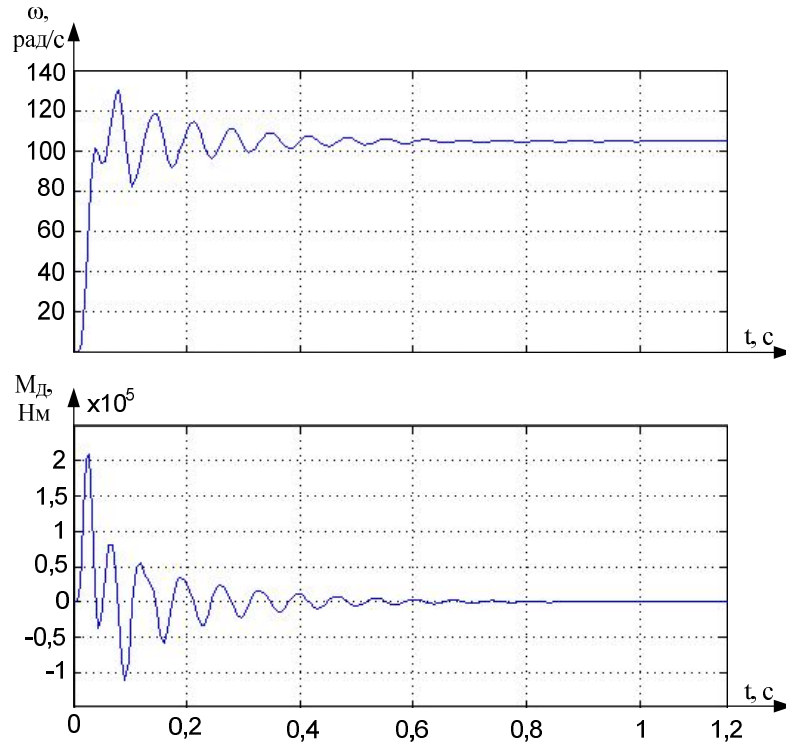


Рис. 3.5. Швидкість обертання та момент двигуна другого типу при запуску без навантаження

Враховуючи те, що один з двигунів живиться від ПЧ, то у його моделі має бути передбачена можливість керування значенням фазної напруги живлення обмотки статора та частотою коливань цієї напруги.

Для розгляду електричної частини моделі регульованого ЕП НА використаємо розімкнуту СЧК [84, с. 39; 85, с. 112; 86, с. 21; 87; 88; 89; 90], функціональна схема якої показана на рис. 3.6.

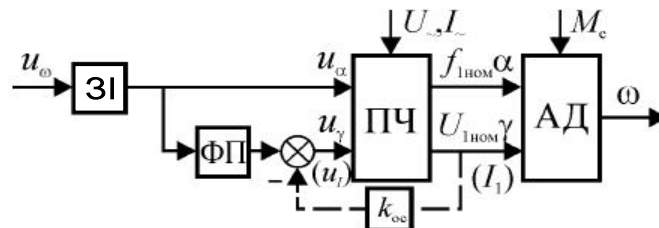


Рис. 3.6. Функціональна схема розімкненої системи частотного керування

У такій системі АД підключений до ПЧ, який має два незалежних канали керування амплітудою  $U_\gamma$  та частотою  $u_\alpha$  вихідної напруги чи струму. Канал керування напругою може бути охоплений ЗЗ по напрузі чи струму (штрихова лінія). Функціональний перетворювач ФП необхідний для формування закону керування напругою чи струмом статора АД в залежності від частоти. Задавач інтенсивності (ЗІ) слугує для задавання швидкості наростання чи зменшення вхідного сигналу таким чином, щоб виключити електричні та механічні перевантаження.

За допомогою ФП [86, с. 21; 87; 90] може бути реалізована будь-яка залежність напруги статора АД від частоти, що необхідно для подолання статичного моменту. Під час пуску частота змінюється до значення, відповідного напрузі  $1,1 U_{\text{ном}}$ . «При подальшому підвищенні частоти напруга статора АД має бути обмежена на рівні  $(0,9 \div 1,1) U_{\text{сн}}$ , а підвищення швидкості в цій зоні здійснюється за рахунок підвищення частоти та (або) за рахунок зменшення основного потоку (послаблення поля) двигуна» [86, с. 21].

Для забезпечення зміни моменту двигуна відповідно до вентиляторного характеру навантаження під час частотного пуску, необхідно забезпечувати рівність [47; 88; 89; 91]

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}, \quad (3.3)$$

де  $U_1$  – фазне значення напруги живлення АД;  $f_1$  – частота напруги живлення двигуна.

Закон керування (3.3) справедливий при невеликих діапазонах керування і не справджується в області низьких частот. Оскільки для потреб забезпечення сумісної роботи НА регулювання не перевищує 2:1, то його можна застосовувати в даному випадку.

Для двигуна другого типу закон частотного керування набуде вигляду

$$\frac{U_{1.\text{ном}(2)}}{f_{1.\text{ном}(2)}^2} = \frac{6000}{50^2} = 1,386.$$

Обмеження напруги виконаємо на рівні  $U_{1.\text{ном}}$ . ЗІ формує на своєму виході наростаючий сигнал, який обмежується на рівні  $\pm 10$  В. Ін-

тенсивність наростання вихідного сигналу визначає тривалість переднього процесу та величину перерегулювання при пуску.

На рис. 3.7 показано комп'ютерну модель розімкнутої системи частотного керування АД першого типу при виконанні умови (3.3), зібрану в ППП Matlab Simulink. Штрих-пунктирною лінією обведено модель ПЧ.

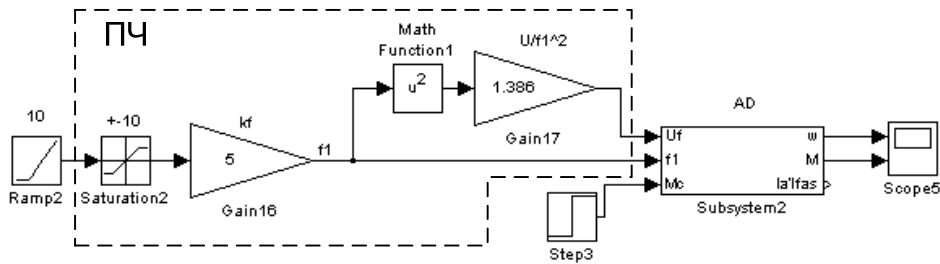


Рис. 3.7. Модель системи ПЧ–АД, зібрана в ППП Matlab Simulink

На рис. 3.7 зображено:  $AD$  – модель АД другого типу в ортогональній системі координат  $\alpha, \beta, 0$  відносно поточкозчеплень (див. (E.1)); Ramp2 – задавач інтенсивності сигналу; Saturation2 – блок обмеження сигналу;  $k_f$  – коефіцієнт підсилення кола частоти ПЧ; Gain17 – коефіцієнт підсилення кола напруги; Math Function1 – блок, який реалізує операцію піднесення до квадрату. Два останні блоки утворюють ФП (див. рис. 3.6), який забезпечує виконання закону (3.3).

Таким чином, модель ПЧ–АД дозволяє оцінити роботу двигуна при частотному способі регулювання його швидкості обертання та вентиляторному характері навантаження.

### 3.3. Модель регульованого насосного агрегата

Поєднавши структури ПЧ, АД (див. рис. 3.7) та ВН (див. рис. 3.1) побудуємо модель регульованого НА. Структурна схема системи ПЧ–АД–ВН при її роботі на мережу споживача, показана на рис. 3.8 [92].

ПЧ формує на виході частоту  $f_1$  напруги живлення, пропорційну задаючій нарузі  $U_{\text{зад}}$ . Напруга  $U_1$ , яка прикладається до обмоток статора двигуна, пропорційна квадрату зміни частоти і визначається зі співвідношення (3.3).

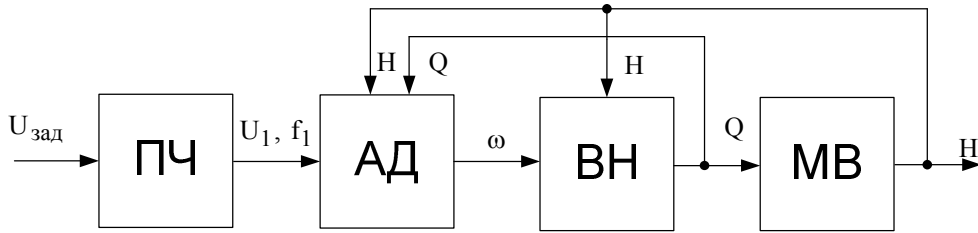


Рис. 3.8. Структурна схема системи ПЧ–АД–ВН

Відповідно до величин напруги живлення та її частоти АД досягає певної швидкості обертання  $\omega$  при певному значенні моменту. На двигун діє момент опору, який визначається з формули

$$M_c = \frac{P}{\omega} = \frac{\rho g Q_{\text{нас}} H}{1000 \omega \eta_{\text{нас}}},$$

де  $P$  – потужність, необхідна для приводу насоса; розраховується за формулою (2.1).

При моделюванні навантаження на двигун для спрощення припустимо, що ККД насоса в процесі експлуатації залишається постійним і рівним номінальному.

Тоді для насоса другого типу коефіцієнт моменту становитиме

$$M_c = k_{MH} \frac{Q_{\text{нас}} H}{\omega} \Rightarrow k_{MH(2)} = 13,004 \text{ (кг/м}^2\text{с}^2\text{)}. \quad (3.4)$$

При цьому, структурна схема системи ПЧ–АД–ВН, зібрана в ППП, Matlab *Simulink*, зображена на рис. 3.9.

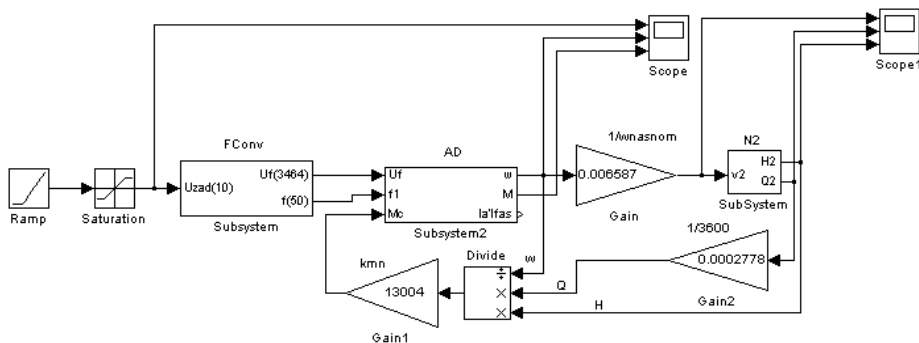


Рис. 3.9. Структурна схема системи ПЧ–АД–ВН, зібрана в ППП Matlab *Simulink*

На рисунку позначено: Fconv – модель ПЧ (див. рис. 3.7); N2 – модель ВН з характеристикою, яка має максимум (див. рис. 3.1).

подамо на вхід системи сигнал, що постійно наростає, з коефіціє-



нтом наростання 10 В/с і обмеженням на рівні 10 В. Отримані при цьому графіки швидкості обертання, тиску та продуктивності показано на рис. 3.10.

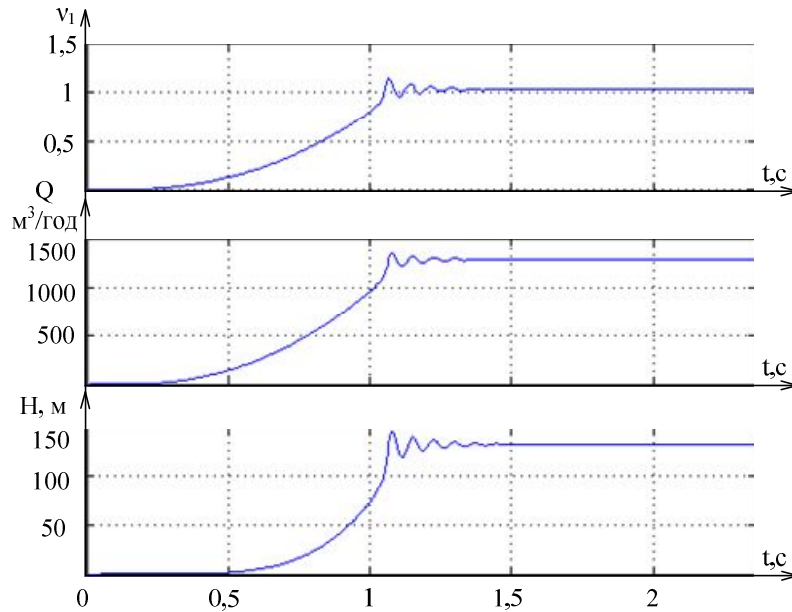


Рис. 3.10. Відносна швидкість обертання робочого колеса насоса, його продуктивності та тиску при інтенсивності сигналу завдання 10 В/с

Побудована модель дозволяє прослідкувати вплив на частотнокерований електропривід навантаження. Система відпрацьовує задаючий сигнал з певним перерегулюванням. Введення в систему зворотного зв'язку дозволить покращити форму перехідного процесу.

### 3.4. Модель паралельної роботи насосів різних типів

Розглянемо паралельну роботу насосів різних типів. При цьому кожен з них впливатиме на роботу іншого через тиск, який розвиватиметься в МВ. Якщо насоси мають однакові характеристики, то вони матимуть однакову продуктивність, а сумарна продуктивність станції визначатиметься як добуток продуктивності одного насоса на кількість працюючих агрегатів. При роботі насосів з різними характеристиками задача визначення сумарного значення продуктивності ускладнюється тим, що в мережі встановлюється певне значення тиску, відповідно до якого кожен з насосів забезпечує певну подачу. Сумарна

продуктивність при цьому дорівнює сумі продуктивностей кожного насоса при встановленому значенні тиску.

Розглянемо паралельну роботу п'яти насосів, серед яких три насоси мають одну напірно-витратну характеристику, а два – іншу. Сумісна робота в такому разі визначається системою рівнянь

$$\begin{cases} H = A_1 v_1^2 + B_1 v_1 Q_1 + C_1 Q_1^2; \\ H = A_2 v_2^2 + B_2 v_2 Q_2 + C_2 Q_2^2; \\ H = A_1 v_3^2 + B_1 v_3 Q_3 + C_1 Q_3^2; \\ H = A_1 v_4^2 + B_1 v_4 Q_4 + C_1 Q_4^2; \\ H = A_2 v_5^2 + B_2 v_5 Q_5 + C_2 Q_5^2, \end{cases} \quad (3.5)$$

де  $Q_i$ ,  $v_i$  – продуктивність та відносна швидкість обертання робочого колеса  $i$ -го насоса,  $i=1..5$ ;  $H$  – тиск, який встановиться в трубопроводі при паралельній роботі насосів на МВ.

Розв'язавши систему, отримаємо вирази для продуктивностей насосів:

$$Q_1(v_1, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_1 v_1 - \sqrt{B_1^2 v_1^2 + 4C_1 H - 4C_1 A_1 v_1^2}}{C_1}; \quad (3.6)$$

$$Q_2(v_2, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_2 v_2 - \sqrt{B_2^2 v_2^2 + 4C_2 H - 4C_2 A_2 v_2^2}}{C_2}; \quad (3.7)$$

$$Q_3(v_3, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_1 v_3 - \sqrt{B_1^2 v_3^2 + 4C_1 H - 4C_1 A_1 v_3^2}}{C_1}; \quad (3.8)$$

$$Q_4(v_4, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_1 v_4 - \sqrt{B_1^2 v_4^2 + 4C_1 H - 4C_1 A_1 v_4^2}}{C_1}; \quad (3.9)$$

$$Q_5(v_5, H) = \frac{1}{2} \cdot \frac{-B_2 v_5 - \sqrt{B_2^2 v_5^2 + 4C_2 H - 4C_2 A_2 v_5^2}}{C_2}. \quad (3.10)$$

Тобто, продуктивність, яку розвиватиме кожен насос, визначатиметься тиском в трубопроводі.

Комп'ютерна модель паралельної роботи трьох насосів першого та двох насосів другого типів, побудована на основі виразів (3.6)–(3.10), показана на рис. 3.11.

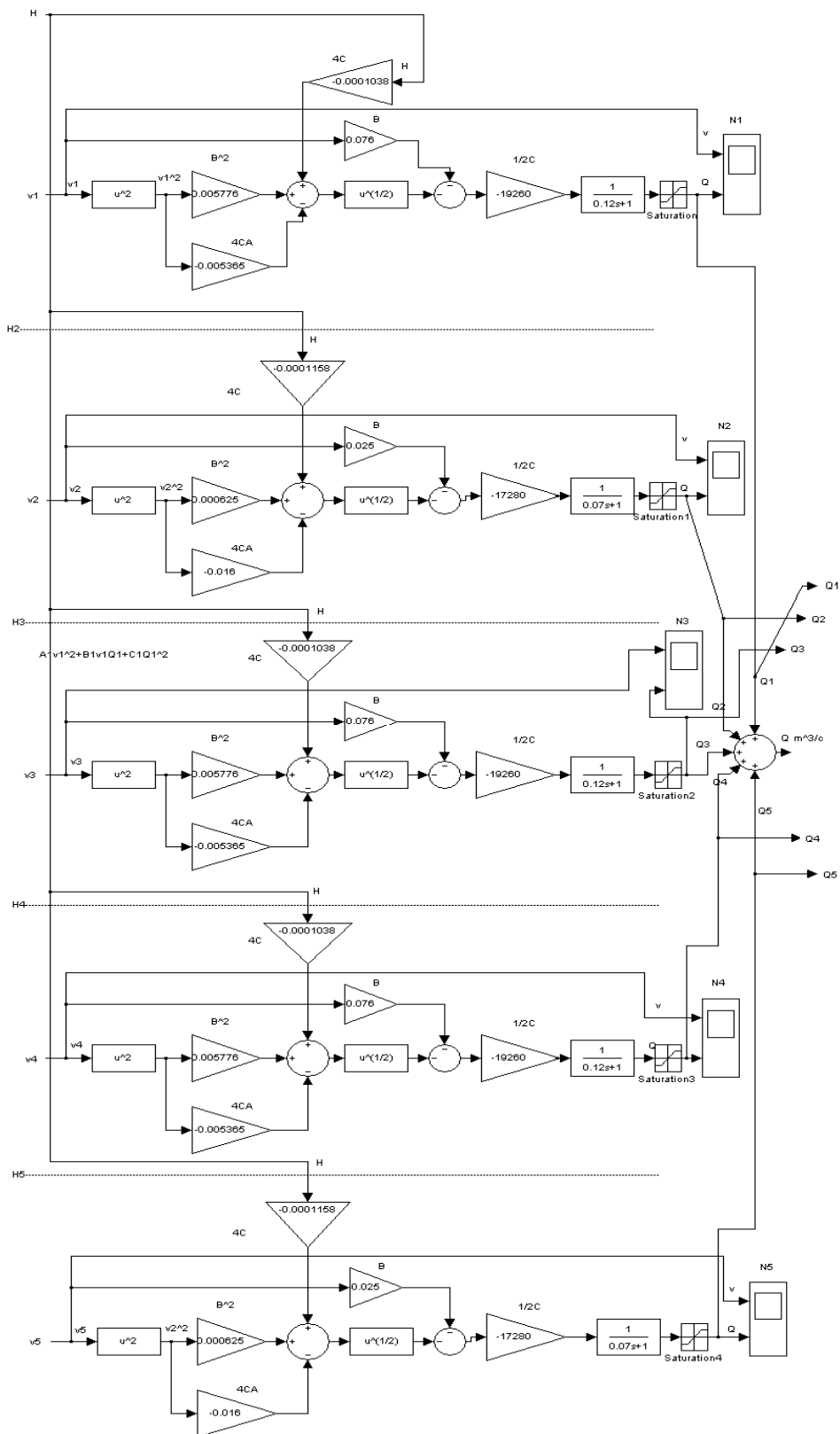


Рис. 3.11. Модель паралельної роботи п'яти насосів на МВ м. Вінниці, зібрана в Simulink ППМ Matlab Release 14

На рис. 3.11 позначено  $H$  – тиск в трубопроводі;  $v_1-v_5$  – відносні швидкості обертання насосів;  $Q_1-Q_5$  – продуктивності насосів.

### 3.5. Модель паралельної роботи насосних агрегатів на мережу споживача

Розглянемо випадок, коли група п'яти насосів працює в МВ (2.18). При цьому сумісна робота НС в МВ описуватиметься системою

$$\begin{cases} H_M = H_c + R_M Q_M^2; \\ H_1 = A_1 v_1^2 + B_1 v_1 Q_1 + C_1 Q_1^2; \\ H_2 = A_2 v_2^2 + B_2 v_2 Q_2 + C_2 Q_2^2; \\ H_3 = A_1 v_3^2 + B_1 v_3 Q_3 + C_1 Q_3^2; \\ H_4 = A_1 v_4^2 + B_1 v_4 Q_4 + C_1 Q_4^2; \\ H_5 = A_2 v_5^2 + B_2 v_5 Q_5 + C_2 Q_5^2; \\ H_M = H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = H_5; \\ Q_M = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \end{cases} \quad (3.11)$$

Оскільки трубопровід є системою з розподіленими параметрами, то проходить певний час від моменту, коли на його вхід було подано певний об'єм рідини до моменту, коли на виході утвориться певне значення тиску. Це значення буде формуватися з запізненням на величину постійної часу, порівняно з продуктивністю яка подаватиметься НС в МВ. Тому представимо ділянку МВ від НС до диктуючої точки аперіодичною ланкою з певною постійною часу [93–95]. При цьому на вхід цієї ланки надходитиме об'єм рідини, який генерує НС, а на виході – кількість рідини в диктуючій точці [96, 97]

$$W_{\text{МВ}} = \frac{Q_{\text{вих}}}{Q_{\text{вх}}} = \frac{1}{C_i p + 1},$$

де  $Q_{\text{вх}}$ ,  $Q_{\text{вих}}$  – кількість рідини на вході та виході ділянки трубопроводу;  $C_i$  – постійна часу заповнення ділянки трубопроводу.

Відповідно до [80, с. 145; 96] постійну часу заповнення ділянки трубопроводу круглого перерізу можна знайти з формули

$$C_i = \frac{V_i}{Q_{i.\text{НОМ}}} = \frac{\pi D_i L_i}{4 Q_{i.\text{НОМ}}},$$

де  $V_i$  – об’єм  $i$ -тої ділянки трубопроводу,  $\text{м}^3$ ;  $Q_{i.\text{НОМ}}$  – номінальне значення об’єму рідини, яке може пропускати  $i$ -та ділянка трубопроводу;  $D_i$  – діаметр трубопроводу,  $\text{м}$ ;  $L_i$  – довжина трубопроводу,  $\text{м}$ .

Для ділянки з  $Q_{i.\text{НОМ}} = 2,222 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $D_i = 0,5 \text{ м}$ ,  $L_i = 2000 \text{ м}$  її передаточна функція запишеться

$$C_i = \frac{3,14 \cdot 0,5 \cdot 2000}{4 \cdot 2,222} = 353,285 \text{ (с)},$$

$$Q_{\text{м}} = \frac{1}{353,285 p + 1} Q_{\Sigma \text{нас}}.$$

При роботі в МВ тиск визначається сумарною подачею НС. Модель паралельно ввімкнених насосів при цьому залишиться без змін за винятком тиску, який визначатиметься точкою перетину характеристики мережі та характеристики НС (див. (2.18)).

Моделі насосів доповнимо моделями АД, один з яких буде живитися від ПЧ. На кожен з двигунів подається свій момент навантаження.

Комп’ютерні моделі паралельної роботи НА в мережі споживача та самої мережі, зібрані в ППП Matlab Simulink, показані, відповідно, на рис. 3.12 та рис. 3.13.

Систему паралельної роботи насосів в мережі споживача об’єднано в блок «5нас–MV». На його вхід подаються відносні швидкості обертання всіх насосів  $v_1-v_5$ , на виході отримуємо їх продуктивності  $Q_1-Q_5$ , а також сумарне значення продуктивності  $Q$  та тиск НС  $H$ .

Елементи Gain 1–5 (див. рис. 3.12) призначені для перетворення швидкості обертання двигуна у відносну швидкість обертання робочого колеса насоса.

Елементи Gain 6–15 разом з елементами Divide призначені для забезпечення навантаження двигуна відповідно до формули (3.4).

AD – модель АД, причому п’ятий АД живиться від ПЧ Fconv.

Блоки запуску двигунів Switch–Switch3 призначені для забезпечення роботи системи при вимкнених двигунах насосів.

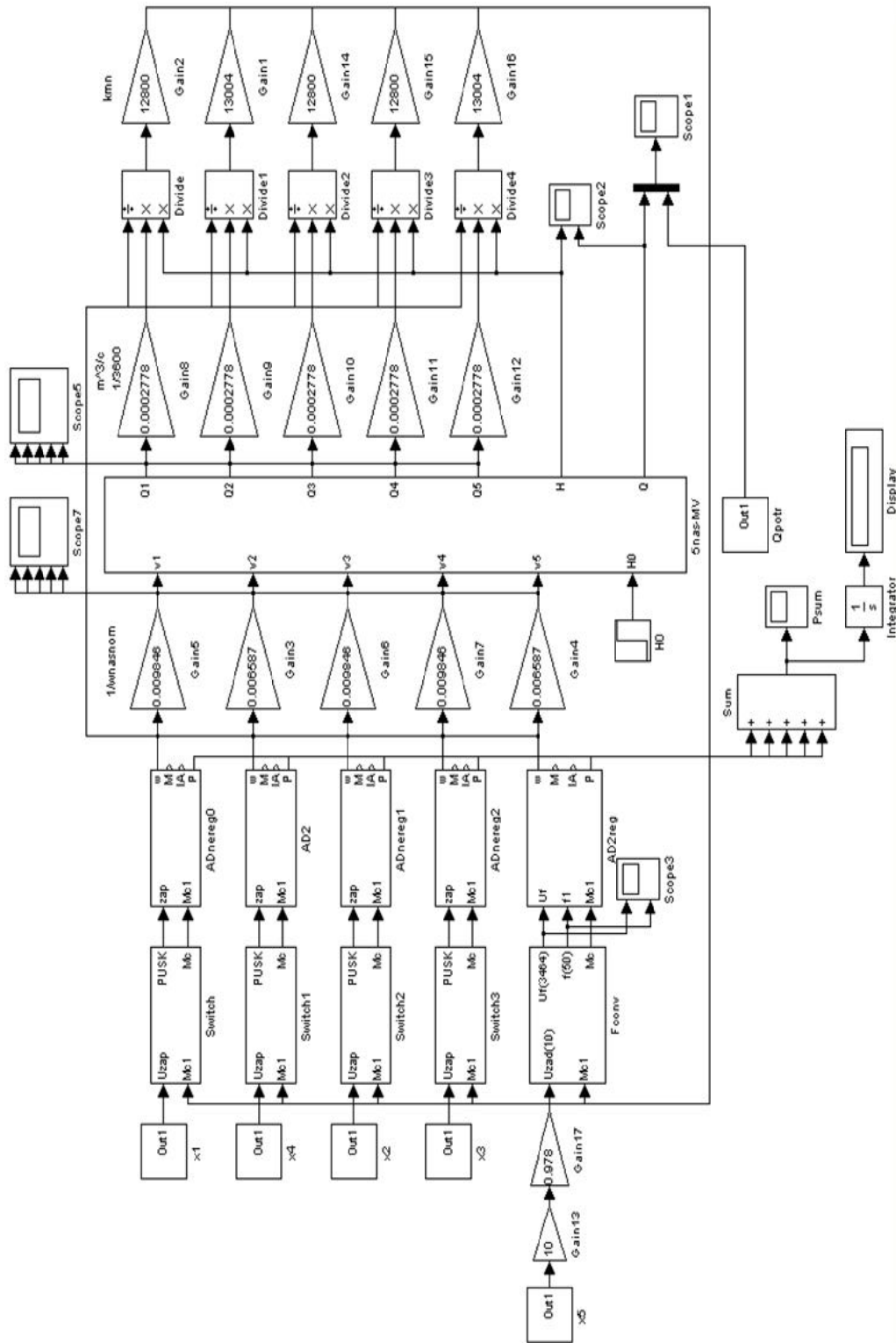


Рис. 3.12. Комп'ютерна модель паралельної роботи НА станції другого підйому м. Вінниці в мережі споживача, зібрана в ППП Matlab Simulink Release 14

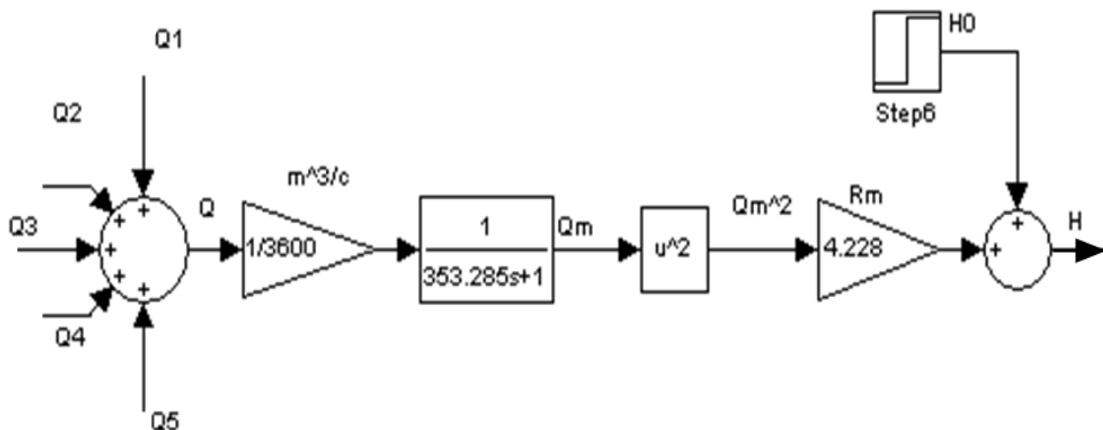


Рис. 3.13. Модель МВ, зібрана в ППП Matlab Simulink

Внутрішня структура блоків запуску показана на рис. 3.14.

Блок запуску двигуна при подачі команди *Uzap* запускає двигун прикладенням до нього номінальної напруги та моменту навантаження *Mc1*.

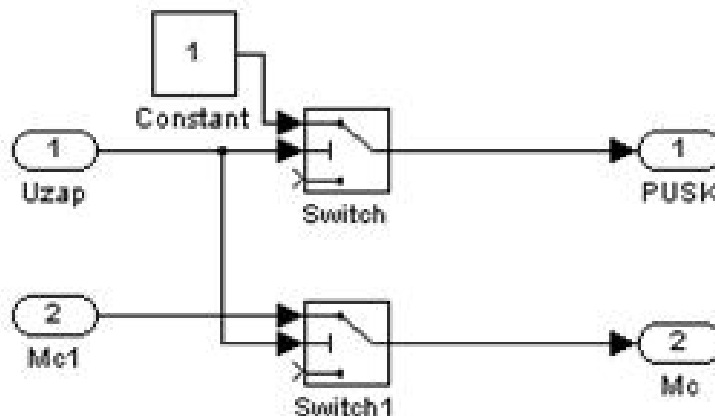


Рис. 3.14. Блок запуску двигуна насоса

Елементи  $x_1$ – $x_5$  (див. рис. 3.12) призначені для формування сигналів запуску двигунів.

Графіки перехідних процесів тиску та продуктивності в трубопроводі при миттєвому запуску всіх агрегатів показані на рис. 3.15.

Таким чином, в диктуючій точці мережі споживача, через 20 хв. встановлюється усталене значення тиску близько 107 м. Сумарна продуктивність станції при цьому становить близько 8650 м<sup>3</sup>/год.

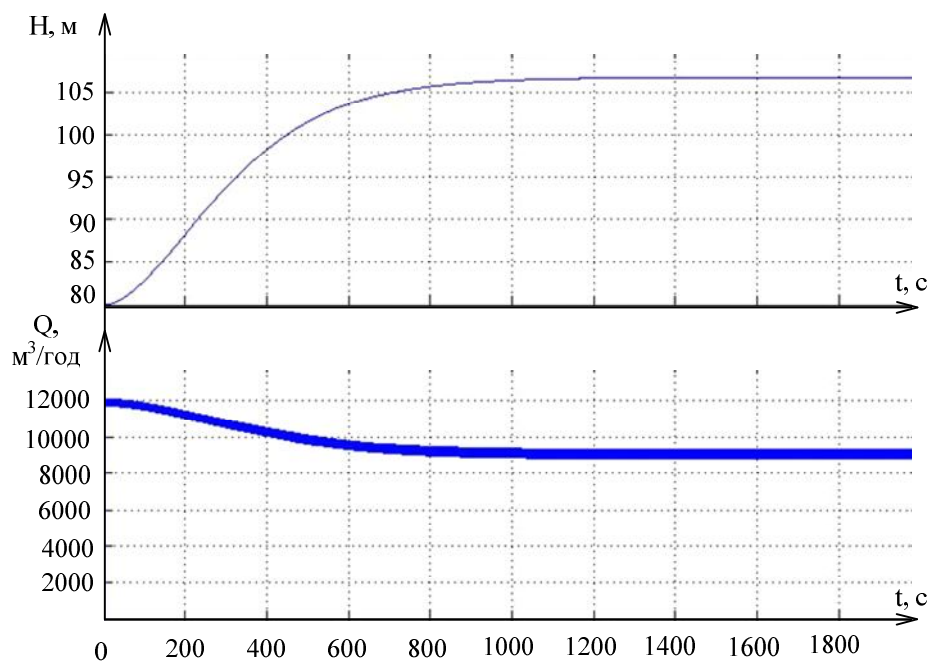


Рис. 3.15. Перехідні процеси тиску  $H$  та продуктивності на виході НС другого підйому м. Вінниці при її роботі в МВ

### 3.6. Перевірка розробленого методу на комп'ютерній моделі системи водопостачання

Промодельюємо добову роботу НС, використовуючи результати розрахунків кількості працюючих насосів та швидкості обертання двигуна регульованого НА.

Відповідно до даних табл. 2.3 сформуємо сигнали запуску та вимкнення двигунів нерегульованих НА  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  та  $x_4$  (див. рис. 3.12). При цьому годину реального часу відобразимо 10, с. модельованого часу. Таким чином, двигун першого насоса ( $x_1$ ) працюватиме постійно протягом доби. Двигун другого насоса ( $x_4$ ) не працюватиме взагалі. Двигун третього насоса ( $x_2$ ) повинен запускатися о 5 год. і вимкнутися о 23 год. Двигун четвертого насоса ( $x_3$ ) повинен працювати з 7 до 10 год.

Швидкість обертання регульованого електроприводу ( $x_5$ ) в кожну годину доби повинна бути рівною швидкості  $v$  з рис. 2.8. Оскільки на вхід ПЧ в номінальному режимі роботи надходить сигнал 10 В, то відносну швидкість  $v$  потрібно підсилити в 10 разів, що і виконано в елементі Gain 13 на рис. 3.12.



В результаті експериментальних досліджень над комп'ютерною моделлю, зображеною на рис. 3.12, отримано значення поправочного коефіцієнта сигналу керування перетворювачем частоти  $k_{\text{попр}} = 0,978$ , при якому забезпечується більш точне значення сумарної продуктивності станції.

Під час моделювання побудованої системи на елементі «Display» (див. рис. 3.12) можна спостерігати за кількістю ЕЕ, яку спожили всі працюючі двигуни НС. Споживана потужність в кожену годину доби представлятиметься елементом  $P_{\text{sum}}$ .

На елементі Score 1 комп'ютерної моделі можна порівняти дійсне значення продуктивності станції  $Q$  (див. рис. 3.12) з потрібним  $Q_{\text{potr}}$  (див. рис. 2.2).

На рис. 3.16 показано тиск  $H$ , потрібне значення продуктивності  $Q_{\text{potr}}$  та дійсне значення сумарної продуктивності станції  $Q$ .

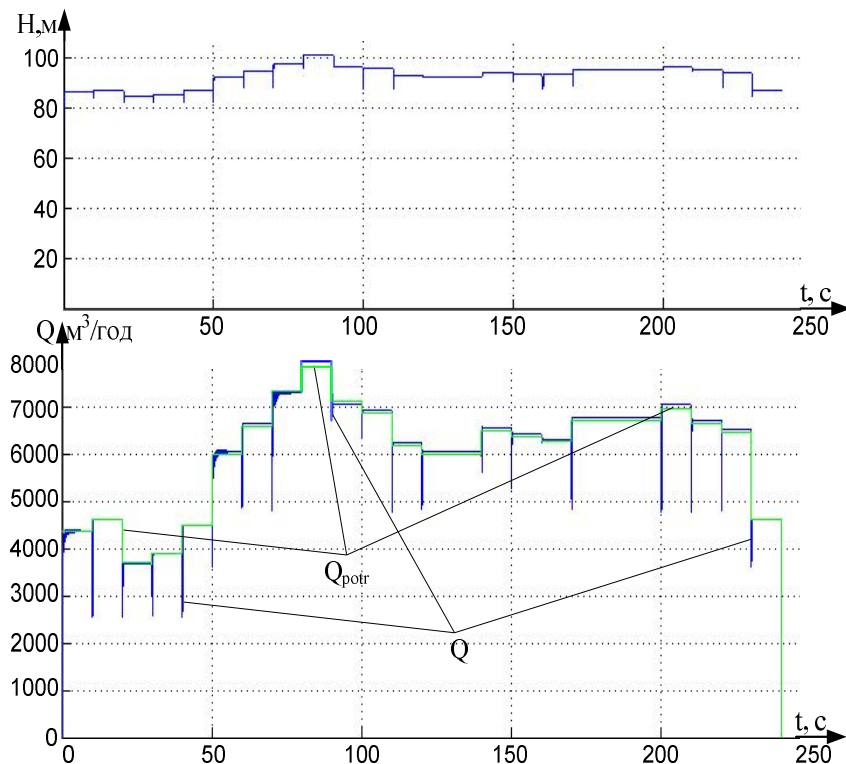


Рис. 3.16. Тиск  $H$ , потрібне значення продуктивності  $Q_{\text{potr}}$  та дійсне значення сумарної продуктивності станції  $Q$

Таким чином, забезпечуючи управління двигунами групи насосів, що працюють паралельно, при якому один з них регульований, можна

досягти регулювання сумарної продуктивності в широких межах. Сумарне значення продуктивності відповідає потрібному (відносна похибка не перевищує 1,5 %). Тиск на виході НС близький до тиску, отриманого в результаті теоретичних досліджень в підрозд. 2.3. Таким чином, результати комп'ютерного моделювання збігаються з теоретичними положеннями монографії, що вказує на правильність виконаних розрахунків.

Оцінимо споживання двигунами насосів ЕЕ за добу. На рис. 3.17 зображено потужність, яку споживають електричні двигуни при регулюванні зміною кількості працюючих насосів ( $P_{const}$ ) та потужність при регулюванні зміною кількості насосів зі зміною продуктивності одного з них ( $P_{var}$ ).

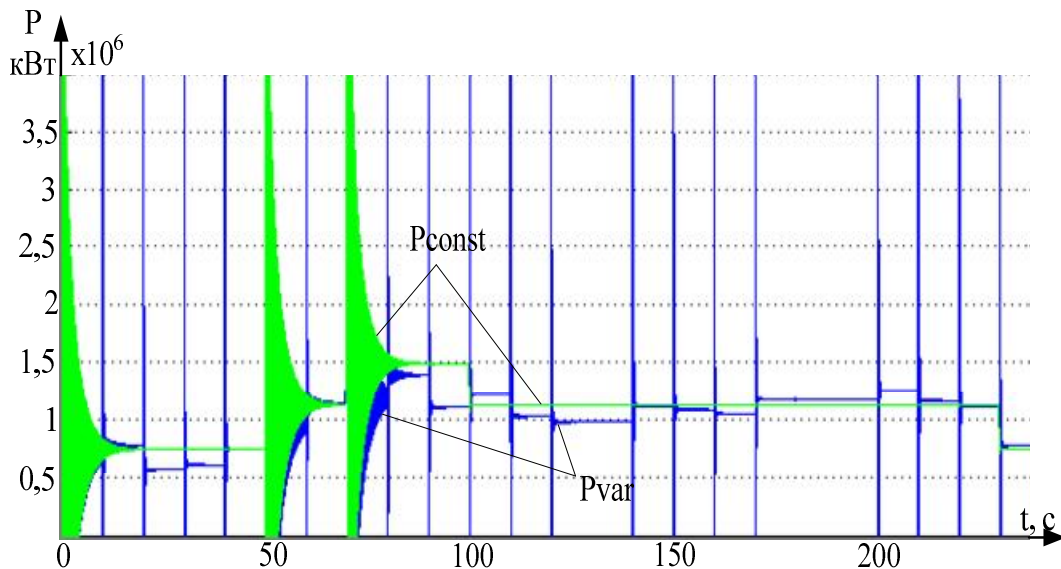


Рис. 3.17. Потужність, яку споживають всі двигуни НС другого підйому м. Вінниці (результати комп'ютерного моделювання)

На рис. 3.17 використано такі позначення:  $P_{var}$  – потужність, яка споживається двигунами НС при регулюванні швидкості обертання одного з них;  $P_{const}$  – потужність, яка споживається двигунами НС при зміні кількості працюючих насосів.

За рахунок того, що в перехідний момент, коли відбувається прямий пуск, струм двигуна суттєво перевищує номінальне значення, на графіку присутні ділянки стрибків потужності.

За результатами моделювання спожитої двигунами насосів поту-

жності не можна точно сказати про ефективність того чи іншого способу регулювання, тому порівнюємо сумарні значення енергії, яку споживають двигуни в одному та в другому випадках. В результаті моделювання роботи системи (одна година реального часу дорівнює 100 секундам модельованого) отримано, що при зміні кількості працюючих двигунів, спожита ними енергія становить 701,67 кВт·добу; при зміні кількості двигунів насосів та регулювання продуктивності одного з них – 683 кВт·добу. Різниця в споживанні становить:

$$\Delta E = 701,67 - 683 = 18,67 \text{ (кВт·добу)}.$$

Ця різниця буде більшою, якщо врахувати дійсний час роботи обладнання.

Крім зменшення споживання енергії регулювання продуктивності станції зміною кількості працюючих насосів та продуктивності одного з них, дозволяє досягти точного значення подачі в широких межах.

Виконано порівняння результатів при регулюванні продуктивності станції відповідно до розробленого методу та регулювання зміною кількості працюючих насосів. При цьому зміна кількості насосів як в першому, так і в другому випадках відбувається, виходячи з оптимізаційних розрахунків за спожитою двигунами ЕЕ, тривалістю безперервної роботи та кількістю реалізованих двигунами прямих пусків. При регулюванні продуктивності іншими способами (див. підрозд. 1.2) спожита НА енергія буде не меншою, ніж при зміні кількості працюючих насосів. Останнє твердження зумовлено тим, що при інших способах регулювання, двигуни працюватимуть з номінальним споживанням енергії, а регулювання забезпечуватиметься зміною гідравлічних параметрів мережі, чи насоса. Тому порівняння розробленого методу виконано, фактично, з найкращим за споживанням енергії способом регулювання.

## РОЗДІЛ 4

### ЗАСОБИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ

#### 4.1. Пристрій керування запуском двигуна насосного агрегата

НА станції водопостачання зазвичай оснащуються асинхронними та синхронними електричними двигунами. Двигуни великої потужності, як правило, мають обмеження на кількість прямих пусків. Вказане обмеження доповнюється необхідністю витримки паузи між пусками. Так, наприклад, інтервал між пусками АД серії 4А великої потужності (більше 250 кВт) становить 3 години; при цьому допускається один пуск з гарячого стану і два пуски з холодного [49]. Для двигуна, який вичерпав свій ресурс по кількості прямих пусків, черговий запуск може призвести до пробою ізоляції і, як наслідок, міжвиткового короткого замикання чи замикання на корпус фази обмотки статора двигуна; виходу його із ладу; зупинки НА; зриву роботи системи водопостачання, яка не забезпечить потрібного значення подачі. Крім того, температурні процеси в обмотці двигуна змінного струму великої потужності впливають на термін його служби не тільки при пуску, а і при охолодженні електричної машини. За статистичними дослідженнями [100] 50–95% причин виходу з ладу електричних машин зумовлені ушкодженням обмотки статора (пробій міжвиткової ізоляції). Тому важливо побудувати систему керування запуском НА станції водопостачання, яка враховувала б усі обмеження на прямий пуск двигуна насоса та оцінювала його можливий термін експлуатації.

В [5] розроблено математичну модель роботи системи керування НА станції водопостачання, яка б враховувала особливості запуску електричних двигунів великої потужності.

Вкажемо на ті параметри електричних машин, які визначаються заводом-виробником відповідно до діючих стандартів [6] та вказуються в паспорті машини [49]: кількість прямих пусків  $N$  за певний період часу (день, рік, термін служби); напруга  $U_1$  та частота  $f_1$  мережі живлення відносно номінальних значень  $U_n$  та  $f_n$ ; клас нагрівостійкості, з якого визначається граничне значення температури  $C_{гр}$ ; допустима

кількість пусків з гарячого  $N_g$  та холодного  $N_h$  станів; інтервал між пусками з холодного стану  $T$ ; температура навколишнього середовища  $C_0$  тощо.

В [5] запропоновано математичну модель системи, яка визначає час запуску двигуна в залежності від обмежень на величину напруги та кількість пусків з гарячого і холодного станів двигуна. Ця модель має недолік, який полягає в тому, що не дозволяє коректно експлуатувати двигун, якщо час між його пусками більший за допустиму витримку часу при пуску з холодного стану, а, отже, двигун може запускатися без обмежень на роботу в холодному стані [5, с. 310]. Мається на увазі, якщо інтервал між пусками двигуна буде більшим ніж  $T$ , то двигун відразу запуститься з обнуленням кількостей пусків з гарячого та холодного станів (змінні  $g$  та  $h$ ). Коли двигун вимкнувся і запускається відразу після проходження  $T$ , то цей запуск буде ніби нулевим і його не можна віднести ні до запуску з холодного стану, ні до запуску з гарячого стану, кількість яких регламентована. Виходить, що при витримці часу між пусками  $T+1$  с. двигун можна запускати довільну кількість разів в межах загальної кількості прямих пусків, що суперечить [7, пп. 4.1.12–4.1.13; 50, с. 89–90].

З врахуванням вказаного недоліку математична модель роботи пристрою запуску двигуна великої потужності буде мати вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} n \leq N; \\ U_1 \geq 0,8U_H; \\ c \leq C_{гр}; \\ \text{Якщо } c \leq 1,03C_0 \text{ та} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Якщо } t_n - t_{n-1} \geq T_g, \text{ то } \begin{cases} t_{n+1} = t; \\ h = 0; \\ g = 0; \end{cases} \\ \text{Якщо } \begin{cases} T_h \leq t_n - t_{n-1} < T_g, \\ h \leq N_h, \end{cases} \text{ то } \begin{cases} t_{n+1} = t; \\ h = h + 1; \end{cases} \\ \text{Якщо } t_n - t_{n-1} \leq T_h, \text{ то } t_{n+1} = t + T_h; \end{array} \right. \\ \text{Якщо } \begin{cases} c > 1,03C_0, \\ g \leq N_g, \end{cases} \text{ то } \begin{cases} t_{n+1} = t; \\ g = g + 1. \end{cases} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

В (4.1) використано такі позначення:  $T_h$  – інтервал між пусками з холодного стану;  $t_{n-1}$  – час попереднього запуску;  $t_n$  – поточне значення часу;  $t_{n+1}$  – час наступного запуску;  $T_h$  – інтервал між пусками з холодного стану;  $T_g$  – інтервал між пусками з гарячого стану;  $t$  – астрономічний час;  $N_g$  – допустима кількість пусків з гарячого стану;  $N_h$  – допустима кількість пусків з холодного стану. Для підрахунку кількості пусків з гарячого та холодного станів також використано проміжні змінні відповідно  $g$  та  $h$ .

Перша нерівність системи враховує обмеження на загальну допустиму кількість прямих пусків двигуна чи то за день, чи за рік, чи за термін експлуатації. Друга та третя нерівності – обмеження на напругу живлення двигуна та температуру його статорної обмотки. При виконанні умови четвертої нерівності, коли двигун знаходиться в холодному стані, перевіряється час між поточним станом та попереднім пуском. Якщо він більший за  $T_g$ , то в якості часу наступного запускузначається поточний час і в цей момент видається команда на запуск двигуна. Якщо ж знаходиться в межах між  $T_h$  та  $T_g$ , то двигун також запускається, але цей запуск вже вважається як перший з холодного стану. Якщо час між поточним станом та попереднім пуском менший за  $T_h$ , то команда на запуск двигуна подається після проходження часу  $T_h$ . Останньою умовою системи (4.1) забезпечується подання команди на запуск двигуна з гарячого стану допустиму кількість разів.

Для отримання структури пристрою, робота якого б відповідала (4.1), припустимо, що він містить найпростіші логічні елементи, такі як І, АБО, АБО–НІ, R–S тригер та логічний елемент затримки сигналу  $\tau$ .

Для порівняння відповідності аналогових величин їхнім допустимим значенням використовуються сенсори та перетворюючі пристрої, на виході яких отримуємо логічний сигнал «1» чи «0», який засвідчує виконання чи невиконання певної умови. Далі ці сигнали подаються у цифрову схему пристрою, певним чином спрацьовують і на виході отримуємо логічний сигнал «1» на запуск насосного агрегата чи «0» на його зупинку.

Для синтезу структури пристрою, який би реалізовував математичну модель (4.1), використаємо математичний апарат секвенцій [100].

Для спрощення процедури синтезу розглянемо структуру пристрою у вигляді, зображеному на рис. 4.1 [101].

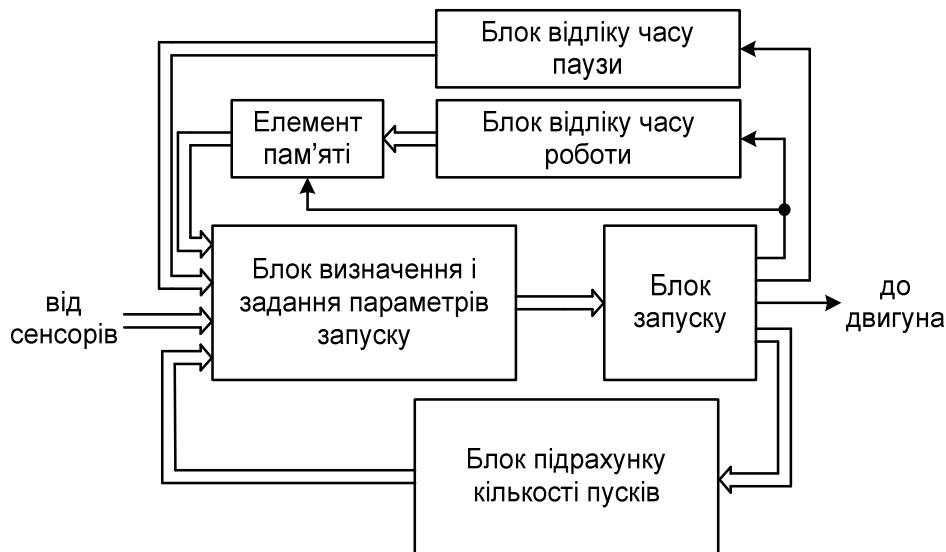


Рис. 4.1. Структура пристрою керування запуском двигуна великої потужності

Блок визначення і задання параметрів запуску забезпечує виділення стану, в якому знаходиться двигун перед запуском, відносно його напруги живлення, температури навколишнього середовища та обмотки статора, часу між попереднім запуском і поточним станом. На його виході отримуємо двійковий сигнал дозволу на пуск двигуна в одному із можливих варіантів: пуск з холодного стану при інтервалі між попереднім пуском і поточним значенням часу, більшому за  $T_g$  (сигнал дозволу  $x_0$ ); пуск з холодного стану при вказаному інтервалі, меншому ніж  $T_g$ , але більшому за  $T_h$  (сигнал дозволу  $x_h$ ); пуск з гарячого стану (сигнал дозволу  $x_g$ ). Причому, якщо активний хоч один з виходів блока, то сигнал роботи  $x_p$  встановлюється в одиницю, якщо ж двигун не запускається ні в одному з можливих варіантів пуску то  $x_p$  встановлюється в нуль, що позначають  $\bar{x}_p$ . Блок визначення і задання параметрів запуску представлятиме собою набір аналогових компараторів, на виході яких отримується цифровий двійковий сигнал, відповідний результату порівняння вхідних аналогових величин; логічних елементів АБО, І; цифрових компараторів, призначених для відслідковування часу між пусками двигуна та порівняння кількостей пусків.

Блок запуску, в залежності від варіанта запуску двигуна, забезпечує видачу команд на його запуск, на спрацювання лічильників кіль-

кості запусків і на системи відліку часу. Тобто на вхід системи надходять двійкові постійні сигнали  $x_0$ , чи  $x_h$ , чи  $x_g$ , а на виході отримуємо відповідні імпульсні сигнали  $x'_0$ ,  $x'_h$ ,  $x'_g$  та імпульсний сигнал паузи  $\bar{x}'_p$ .

Сигнали роботи та паузи надходять на відповідні блоки відліку часу. Блок відліку часу призначений за вхідним сигналом запустити відлік імпульсів часу поки не прийде сигнал зупинки цього відліку. На його виході маємо двійковий код певного розряду, який відповідний часу роботи чи паузи двигуна.

Елемент пам'яті необхідний для фіксації часу роботи при наступному запуску двигуна, оскільки в протилежному випадку можливе перекидання двигуна на друге коло запуску.

Блок підрахунку кількості пусків формує на своєму виході двійкові коди, відповідні загальній кількості пусків і кількості пусків з гарячого та холодного станів.

Блок визначення і задання параметрів запуску синтезуємо методом логічно-структурного аналізу [102], за яким вказаний блок на існуючій елементній базі можна представити структурною схемою, зображеною на рис. 4.2 [8; 101].

На рисунку позначено: 1 – блок запуску; 2, 3, 4 – відповідно сенсори напруги мережі живлення, температури обмотки статора двигуна та температури навколишнього середовища; 5 – підсилювач сигналу; 6, 7, 8 – аналогові компаратори; 9–13 – логічні елементи АБО-НІ; 14 – логічний елемент АБО; 15–19 – логічні елементи І; 20–24 – відповідно блоки задання допустимої кількості пусків (БДКП), витримки часу з холодного стану (БЗВЧХС), витримки часу з гарячого стану (БЗВЧГС), допустимої кількості пусків з холодного стану (БЗДКПХС) та допустимої кількості пусків з гарячого стану (БЗДКПГС); 25–29 – цифрові компаратори; 30 – цифровий суматор; 31 – елемент затримки сигналу  $T_h$ .

Розглянемо блок запуску (див. рис. 4.1). Для роботи лічильників імпульсів неперервні сигнали  $x_0$ ,  $x_h$ ,  $x_g$  чи  $x_p$  в блоці запуску потрібно перетворити в відповідні імпульсні  $x'_0$ ,  $x'_h$ ,  $x'_g$  чи  $x'_p$ . Тривалість імпульсу при цьому повинна бути достатньою для спрацювання тригерів лічильників. Це перетворення виконується в одновібраторі. Крім того необхідно передбачити і тригери для запуску блоків відліку часу ро-



боти та паузи за сигналом роботи  $x_P$  чи паузи  $\bar{x}_P$ , відповідно.

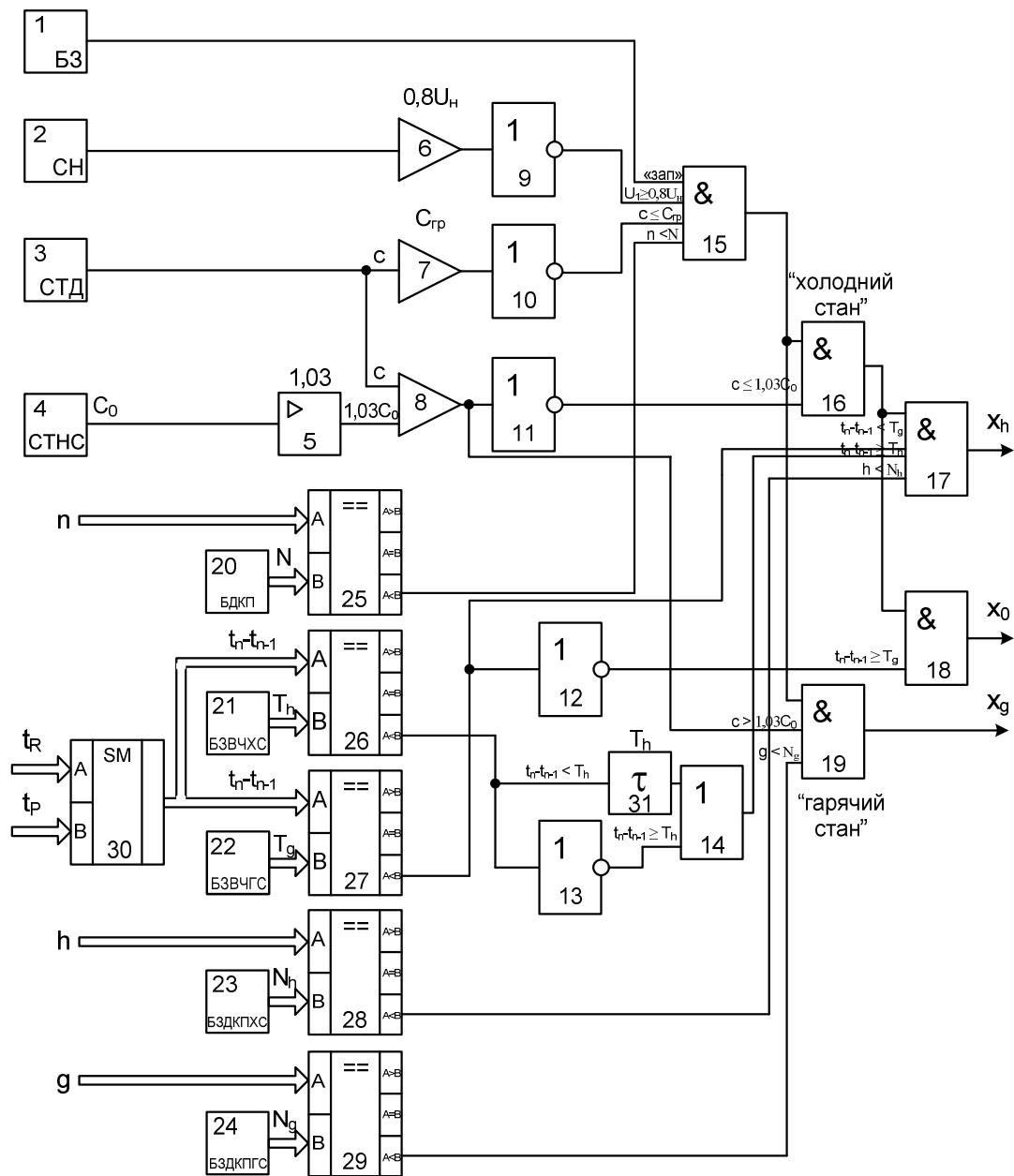


Рис. 4.2. Структурна схема блоку визначення і задання параметрів

Таким чином стани блока запуску визначатимуться шістьма тригерами, а саме тригером одновібратора запуску при умові  $x_0$  ( $T_{13}$ ), тригером одновібратора запуску при умові  $x_h$  ( $T_{12}$ ), тригером одновібратора запуску при умові  $x_g$  ( $T_{14}$ ), тригером одновібратора зупинки  $\bar{x}_P$  ( $T_{15}$ ), тригером запуску блоку відліку часу паузи ( $T_{18}$ ) та тригером запуску блоку відліку часу роботи ( $T_{19}$ ). В якості позначення стану три-

герів використаємо такі:  $T_i$  – означає, що  $i$ -й тригер встановлений в одиницю,  $\bar{T}_i$  –  $i$ -й тригер встановлений в нуль (обнулений). Граф функціонування блока запуску показано на рис. 4.3 [101].

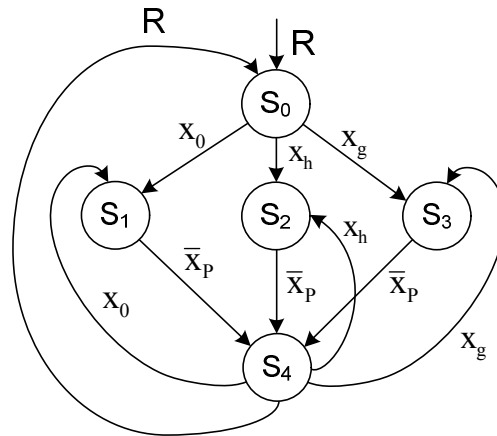


Рис. 4.3. Граф функціонування блока запуску

Зображений граф описується системою секвенцій

$$\left\{ \begin{array}{l} RS_4 \mid - S_0; \\ x_0 S_0 \vee x_0 S_4 \mid - S_1; \\ x_h S_0 \vee x_h S_4 \mid - S_2; \\ x_g S_0 \vee x_g S_4 \mid - S_3; \\ \bar{x}_p S_1 \vee \bar{x}_p S_2 \vee \bar{x}_p S_3 \mid - S_4, \end{array} \right. \quad (4.2)$$

де

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 \in \bar{T}_{12} \bar{T}_{13} \bar{T}_{14} \bar{T}_{15} \bar{T}_{18} \bar{T}_{19}; \\ S_1 \in \bar{T}_{12} T_{13} \bar{T}_{14} \bar{T}_{15} T_{18} \bar{T}_{19}; \\ S_2 \in T_{12} \bar{T}_{13} \bar{T}_{14} \bar{T}_{15} T_{18} \bar{T}_{19}; \\ S_3 \in \bar{T}_{12} \bar{T}_{13} T_{14} \bar{T}_{15} T_{18} \bar{T}_{19}; \\ S_4 \in \bar{T}_{12} \bar{T}_{13} \bar{T}_{14} T_{15} \bar{T}_{18} T_{19}. \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Підставивши (4.3) в (4.2) та мінімізувавши отриману систему секвенцій, використовуючи властивості секвенцій [100], отримаємо (4.4).

На основі отриманої мінімізованої системи секвенцій (4.4) синтезуємо структурну схему блока запуску. Синтезована схема у вигляді діодної сітки [100] показана на рис. 4.4.

$$\left\{ \begin{array}{l} R\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}T_{15}\bar{T}_{18}T_{19} \mid - \bar{T}_{15}\bar{T}_{19}; \\ x_0\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{18}(\bar{T}_{15}\bar{T}_{19} \vee T_{15}T_{19}) \mid - T_{13}\bar{T}_{15}T_{18}\bar{T}_{19}; \\ x_h\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{18}(\bar{T}_{15}\bar{T}_{19} \vee T_{15}T_{19}) \mid - T_{12}\bar{T}_{15}T_{18}\bar{T}_{19}; \\ x_g\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{18}(\bar{T}_{15}\bar{T}_{19} \vee T_{15}T_{19}) \mid - T_{14}\bar{T}_{15}T_{18}\bar{T}_{19}; \\ \bar{x}_p\bar{T}_{15}T_{18}\bar{T}_{19}(\bar{T}_{12}T_{13}\bar{T}_{14} \vee T_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14} \vee \bar{T}_{12}\bar{T}_{13}T_{14}) \mid - \bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}T_{15}\bar{T}_{18}T_{19}. \end{array} \right. \quad (4.4)$$

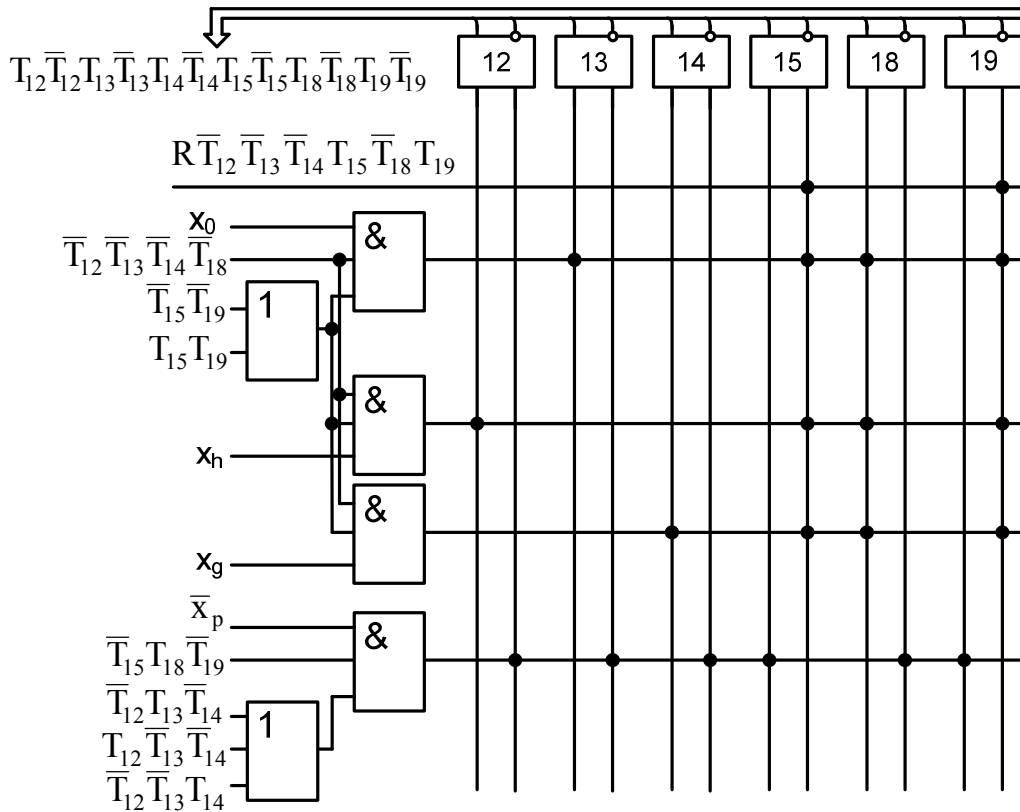


Рис. 4.4. Структурна схема блока запуску

Вхідні сигнали і сигнали стану надходять на схеми збігів. Кожному виходу зі схем збігів відповідає свій рядок в діодній матриці. Місця вмикання діодів на схемі відмічені крапками. Кожному стовпцю цієї матриці відповідає один із виходів на двостабільний елемент ( $R-S$  тригер).

Розглянемо блок підрахунку кількості пусків. Як уже зазначалося на його вхід надходять імпульсні сигнали запуску з холодного стану  $x'_0$  коли час між поточним та попереднім пусками, більший або рівний  $T_g$ , сигнал запуску з холодного стану  $x'_h$  при інтервалі між пусками від

$T_h$  до  $T_g$ , сигнал запуску з гарячого стану  $x'_g$  та імпульсний сигнал зупинки двигуна  $\bar{x}'_p$ .

Стани блока підрахунку кількості пусків визначатимуться тригерами лічильників загальної кількості пусків, лічильників кількості гарячих та холодних пусків. Для спрощення розглянемо випадок, коли допустима загальна кількість пусків не перевищує 4, допустима кількість пусків з холодного стану – 2, гарячого стану – 1, а витримки часу при пуску з гарячого стану 4 с., холодного – 2 с. Перший запуск виконується з холодного стану двигуна після проходження  $T_g$  від моменту попереднього запуску.

Певним кількостям імпульсів лічильників кількості пусків відповідають такі комбінації станів тригерів  $T_i$  та  $T_j$ : один імпульс –  $T_i T_j$ , два імпульси –  $\bar{T}_i T_j$ , три імпульси –  $T_i \bar{T}_j$ , чотири імпульси –  $\bar{T}_i \bar{T}_j$ . Граф функціонування блока підрахунку кількості пусків показано на рис. 4.5.

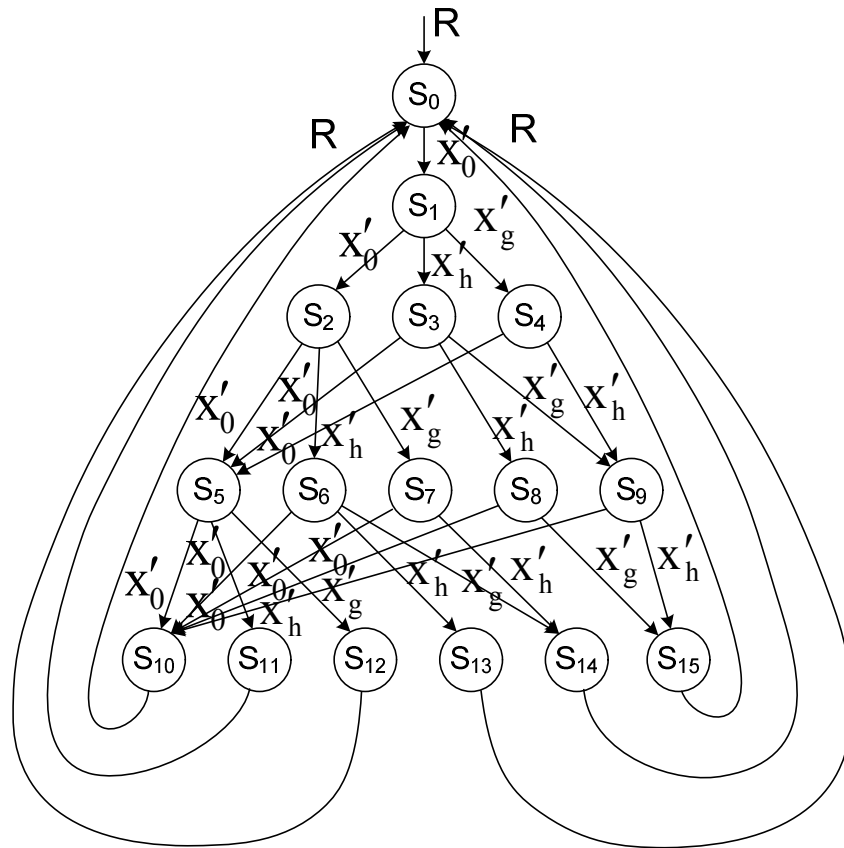


Рис. 4.5. Граф функціонування блока підрахунку кількості пусків

Зображений граф описується системою секвенцій

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 R(S_{10} \vee S_{11} \vee S_{12} \vee S_{13} \vee S_{14} \vee S_{15}) \vdash S_0; & \\
 x'_0 S_0 \vdash S_1; & \\
 x'_0 S_1 \vdash S_2; & \\
 x'_h S_1 \vdash S_3; & x'_h S_5 \vdash S_{11}; \\
 x'_g S_1 \vdash S_4; & x'_g S_5 \vdash S_{12}; \\
 x'_0 (S_2 \vee S_3 \vee S_4) \vdash S_5; & x'_h S_6 \vdash S_{13}; \\
 x'_h S_2 \vdash S_6; & x'_g S_6 \vee x'_h S_7 \vdash S_{14}; \\
 x'_g S_2 \vdash S_7; & x'_g S_8 \vee x'_h S_9 \vdash S_{15}, \\
 x'_h S_3 \vdash S_8; & \\
 x'_g S_3 \vee x'_h S_4 \vdash S_9; & \\
 x'_0 (S_5 \vee S_6 \vee S_7 \vee S_8 \vee S_9) \vdash S_{10}; &
 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

де

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 S_0 \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}; & S_8 \in \bar{T}_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_1 \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} T_{11}; & S_9 \in T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_2 \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11}; & S_{10} \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_3 \in T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11}; & S_{11} \in T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_4 \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} T_{11}; & S_{12} \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_5 \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \bar{T}_{11}; & S_{13} \in \bar{T}_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_6 \in T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \bar{T}_{11}; & S_{14} \in T_6 T_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}; \\
 S_7 \in \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9 T_{10} \bar{T}_{11}; & S_{15} \in \bar{T}_6 T_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11}.
 \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Побудувавши відповідну графові функціонування систему секвенцій та мінімізувавши її, використовуючи властивості секвенцій [100], отримаємо [101] вираз (4.7).

На основі отриманої мінімізованої системи секвенцій (4.7) синтезуємо структурну схему блока підрахунку кількості пусків [100], яка наведена на рис. 4.6.

Структурна схема складається з 17 логічних елементів І, 7 логічних елементів АБО та 6 тригерів. В залежності від комбінації вхідних сигналів та початкового стану тригерів, вони або встановлюються в одиницю, або обнуляються.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\bar{T}_{11}(R\bar{T}_{10} \vee x'_0 T_{10})(\bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee \\
\vee \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9 \vee \bar{T}_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee T_6 T_7 T_8 T_9) \vee \\
\vee R\bar{T}_6 T_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} \mid \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}; \\
x'_0 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} \mid T_{10} T_{11}; \\
x'_0 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} T_{11} \mid \bar{T}_{10}; \\
x'_h \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \mid T_6 T_7 \bar{T}_{10}; \\
x'_g \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} T_{11} \mid T_8 T_9 \bar{T}_{10}; \\
x'_0 \bar{T}_{10} T_{11} (\bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee \\
\vee \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9) \mid \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
x'_h \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \mid T_6 T_7 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
x'_g \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \mid T_8 T_9 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
x'_h T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \mid \bar{T}_6 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
\bar{T}_{10} T_{11} (x'_g T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee \\
\vee x'_h \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9) \mid T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} \bar{T}_{11}; \\
x'_g \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \bar{T}_{11} \mid T_8 T_9 \bar{T}_{10}; \\
x'_h T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 T_{10} \bar{T}_{11} \mid \bar{T}_6 \bar{T}_{10}; \\
T_{10} \bar{T}_{11} (x'_g T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee \\
\vee x'_h \bar{T}_6 \bar{T}_7 T_8 T_9) \mid T_6 T_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10}; \\
T_7 T_{10} \bar{T}_{11} (x'_g \bar{T}_6 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \vee \\
\vee x'_h T_6 T_8 T_9) \mid \bar{T}_6 T_8 T_9 \bar{T}_{10}.
\end{array} \right. \quad (4.7)$$

Граф функціонування блока відліку часу роботи двигуна зображено на рис. 4.7.

Робота підсистеми відліку часу роботи двигуна описується системою секвенцій

$$\left\{ \begin{array}{ll}
x'_G S_1 \mid S_2; & \bar{x}'_G S_6 \mid S_7; \\
x'_p S_1 \vee \bar{x}'_G S_{10} \mid S_3; & x'_G S_7 \mid S_8; \\
x'_G S_3 \vee x'_p x'_G S_1 \vee x'_p S_2 \mid S_4; & \bar{x}'_G S_8 \mid S_9; \\
\bar{x}'_G S_4 \mid S_5; & x'_G S_9 \mid S_{10}. \\
x'_G S_5 \mid S_6; &
\end{array} \right. \quad (4.8)$$

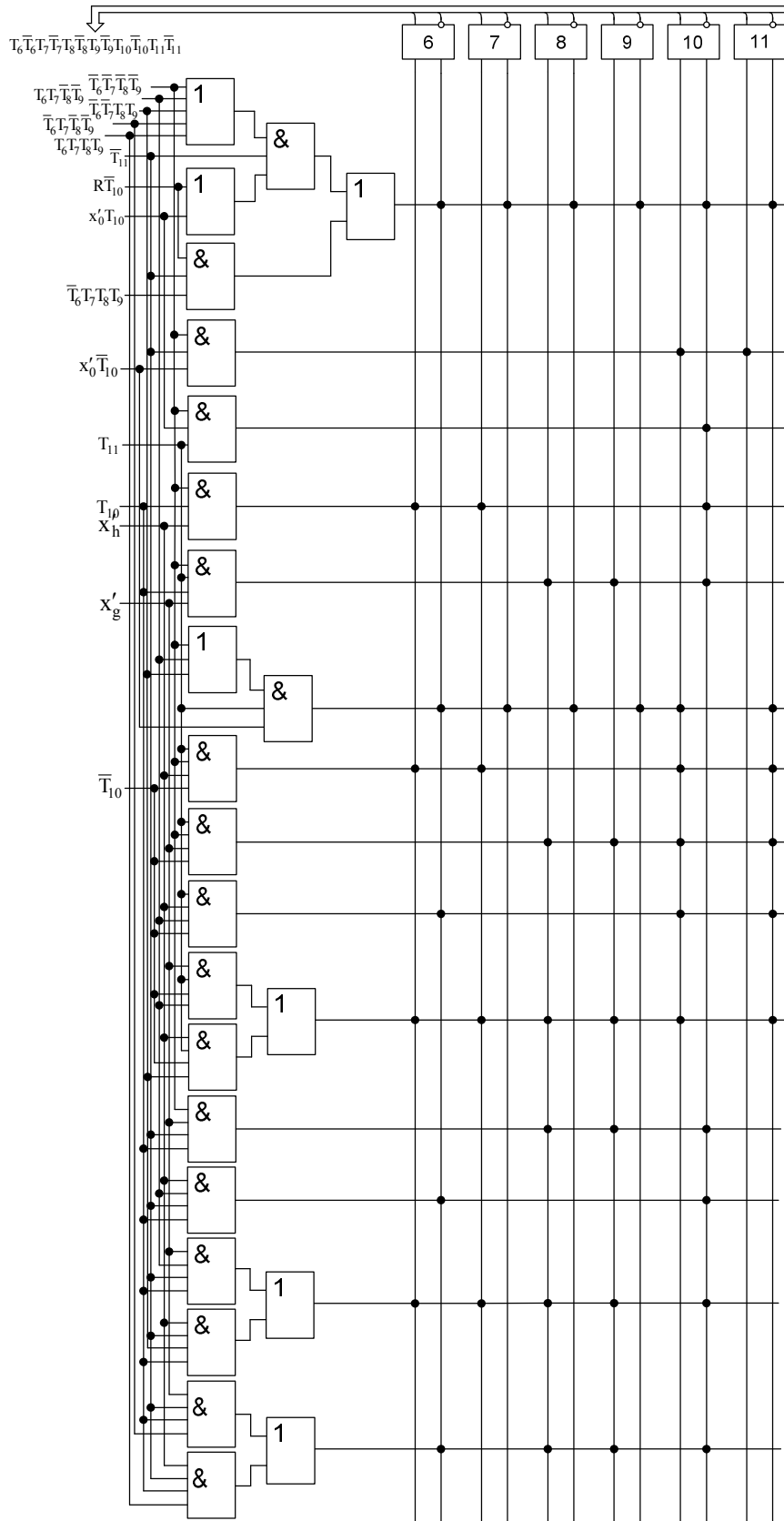


Рис. 4.6. Структурна схема блока підрахунку кількості пусків

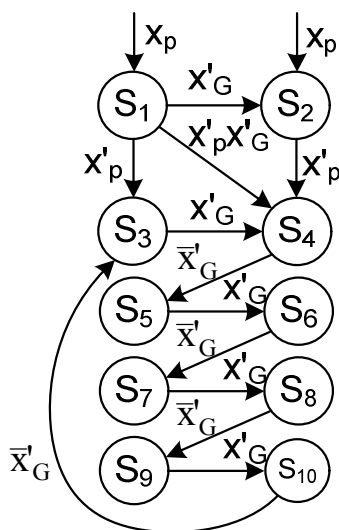


Рис. 4.7. Граф функціонування блока відліку часу роботи двигуна

Кожен з станів системи (4.8) визначається трьома тригерами  $T_1$ ,  $T_4$  та  $T_5$ , а саме:

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_1 \in \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5; & S_6 \in T_1 \bar{T}_4 T_5; \\ S_2 \in T_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5; & S_7 \in \bar{T}_1 \bar{T}_4 T_5; \\ S_3 \in \bar{T}_1 \bar{T}_4 T_5; & S_8 \in T_1 T_4 \bar{T}_5; \\ S_4 \in T_1 T_4 T_5; & S_9 \in \bar{T}_1 T_4 \bar{T}_5; \\ S_5 \in \bar{T}_1 T_4 T_5; & S_{10} \in T_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5. \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Під умовою  $x'_G$  слід розуміти наявність імпульсу на виході генератора, під умовою  $\bar{x}'_G$  – паузу на виході генератора імпульсів.

Підставивши значення станів з (4.10) в (4.9), отримаємо систему

$$\left\{ \begin{array}{ll} x'_G \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \mid - T_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5; & \bar{x}'_G T_1 \bar{T}_4 T_5 \mid - \bar{T}_1 \bar{T}_4 T_5; \\ x'_p \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \vee \bar{x}'_G T_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \mid - \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5; & x'_G \bar{T}_1 \bar{T}_4 T_5 \mid - T_1 T_4 \bar{T}_5; \\ x'_G \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \vee x'_p x'_G \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \vee x'_p T_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \mid - T_1 T_4 T_5; & \bar{x}'_G T_1 T_4 \bar{T}_5 \mid - \bar{T}_1 T_4 \bar{T}_5; \\ \bar{x}'_G T_1 T_4 T_5 \mid - \bar{T}_1 T_4 T_5; & x'_G \bar{T}_1 T_4 \bar{T}_5 \mid - T_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5; \\ x'_G \bar{T}_1 T_4 T_5 \mid - T_1 \bar{T}_4 T_5; & \end{array} \right.$$

спростивши яку, одержимо



$$\left\{ \begin{array}{l} x'_G \bar{T}_1 \bar{T}_5 \mid - T_1 \bar{T}_4; \\ x'_p \bar{T}_1 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \vee \bar{x}'_G T_1 \mid - \bar{T}_1; \\ \bar{T}_4 \bar{T}_5 (x'_G \bar{T}_1 \vee x'_p x'_G \bar{T}_1 \vee x'_p T_1) \mid - T_1 T_4 T_5; \\ x'_G \bar{T}_1 T_4 T_5 \mid - T_1 \bar{T}_4; \\ x'_G \bar{T}_1 \bar{T}_4 T_5 \mid - T_1 T_4 \bar{T}_5. \end{array} \right. \quad (4.10)$$

На основі мінімізованого секвенційного опису на рис. 4.8 синтезуємо структурну схему блока відліку часу роботи двигуна.

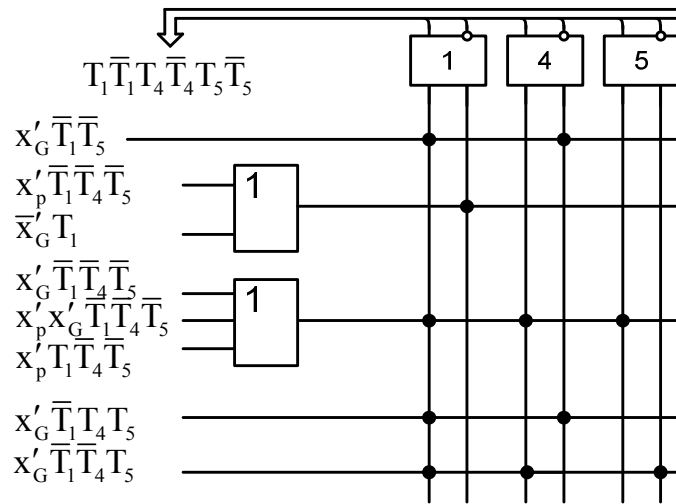


Рис. 4.8. Структурна схема блока відліку часу роботи

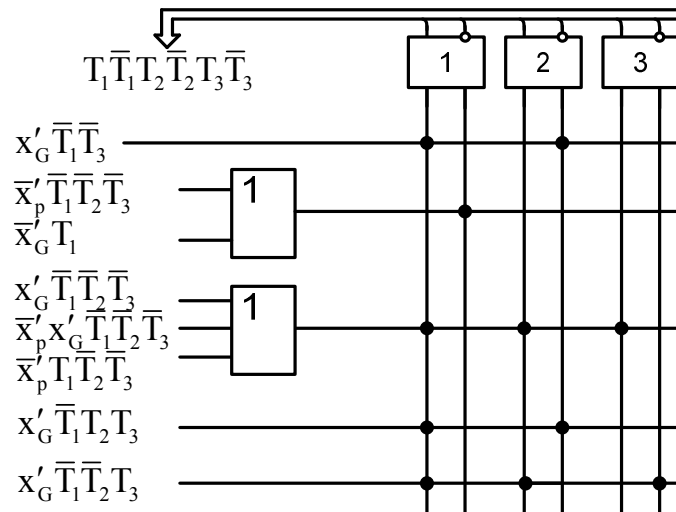


Рис. 4.9. Структурна схема блока відліку часу паузи

Граф функціонування елемента пам'яті зображено на рис. 4.10.

Аналогічно отримано структурну схему блока відліку часу паузи (рис. 4.9), яка відрізняється від схеми, зображеної на рис. 4.8, лише тригерами  $T_4, T_5$  та умовою  $x'_p$  які будуть замінені на тригери лічильника відліку часу паузи  $T_2, T_3$  та умову  $\bar{x}'_p$  відповідно.

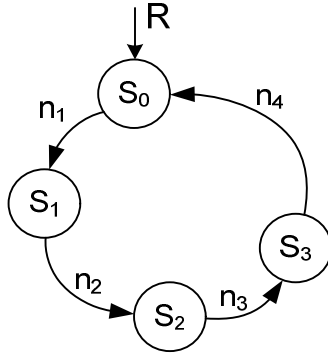


Рис. 4.10. Граф функціонування елемента пам'яті

Робота елемента пам'яті описується системою секвенцій

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 S_0 \vdash S_1; \\ n_2 S_1 \vdash S_2; \\ n_3 S_2 \vdash S_3; \\ n_4 S_3 \vdash S_0. \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Стани системи (4.11) для випадку чотирьох пусків визначаються двома тригерами старшого  $T_{16}$  та молодшого  $T_{17}$  розрядів, а саме:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 \in \bar{T}_{16} \bar{T}_{17}; \quad S_2 \in \bar{T}_{16} T_{17}; \\ S_1 \in T_{16} T_{17}; \quad S_3 \in T_{16} \bar{T}_{17}. \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Під умовою  $n_1$  слід розуміти перший пуск двигуна за лічильником загальної кількості пусків. Під  $n_2, n_3$  та  $n_4$  – відповідно другий, третій та четвертий пуски.

Підставивши значення станів з (4.12) в (4.11), отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 \bar{T}_{16} \bar{T}_{17} \vdash T_{16} T_{17}; \quad n_3 \bar{T}_{16} T_{17} \vdash T_{16} \bar{T}_{17}; \\ n_2 T_{16} T_{17} \vdash \bar{T}_{16} T_{17}; \quad n_4 T_{16} \bar{T}_{17} \vdash \bar{T}_{16} \bar{T}_{17}, \end{array} \right.$$

спростивши яку, одержимо

$$\begin{cases} n_1 \bar{T}_{16} \bar{T}_{17} \mid - T_{16} T_{17}; \\ T_{16} (n_2 T_{17} \vee n_4 \bar{T}_{17}) \mid - \bar{T}_{16}; \\ n_3 \bar{T}_{16} T_{17} \mid - T_{16} \bar{T}_{17}. \end{cases} \quad (4.13)$$

На основі мінімізованого секвенційного опису синтезуємо (рис. 4.11) структурну схему елемента пам'яті.

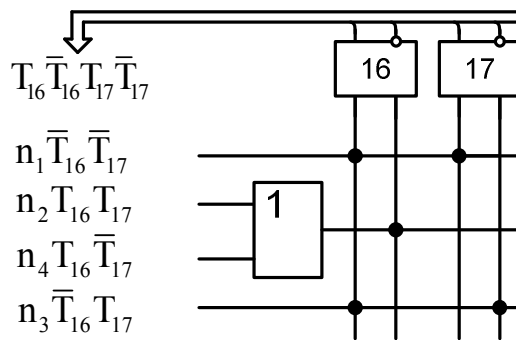


Рис. 4.11. Структурна схема елемента пам'яті

Поєднавши отримані структурні схеми та перетворивши їх до виду, зручного для реалізації на існуючій елементній базі [103], можна отримати структурну схему пристрою керування запуском двигуна великої потужності, яка зображена на рис. 4.12.

На рис. 4.12 позначено [8; 101] 1 – блок запуску (БЗ); 2, 3, 4 – відповідно сенсори напруги мережі (СНМ), температури двигуна (СТД) та температури навколишнього середовища (СТНС); 5 – підсилювач сигналу; 6, 7, 8 – відповідно перший, другий та третій аналогові компаратори; 9, 10, 11, 35, 41, 48 – відповідно перший, другий, третій, четвертий, п'ятий та шостий логічні елементи АБО-НІ; 14, 19, 12, 28, 29, 36, 39 – відповідно перший, другий, третій, четвертий, п'ятий, шостий та сьомий логічні елементи І; 13, 18 – відповідно перший та другий R-S тригери; 15, 20 – відповідно перший та другий генератори імпульсів; 16, 21, 31, 44, 50 – відповідно перший, другий, третій, четвертий та п'ятий лічильники імпульсів; 17, 22 – відповідно перший та другий регістри; 23 – суматор; 24, 26, 32, 45, 51 – відповідно блоки задання допустимої витримки часу при пуску з холодного стану (БЗДВЧХС), допустимої витримки часу при пуску з гарячого стану (БЗДВЧГС), допустимої кількості пусків з холодного

стану (БЗДКПХС), допустимої кількості пусків з гарячого стану (БЗДКПГС) та допустимої кількості пусків (БЗДКП); 25, 27, 33, 46, 52 – відповідно перший, другий, третій, четвертий та п'ятий цифрові компаратори; 30, 37, 43, 49 – відповідно перший, другий, третій та четвертий одновібратори; 34, 38, 42 – відповідно перший, другий та третій логічні елементи АБО; 40 – елемент затримки сигналу; 47 – блок обнулення кількості пусків.

Розроблений пристрій працює так.

При подачі напруги живлення на схему одночасно на виходах першого 15 та другого 20 формувачів імпульсів починають вироблятися послідовності імпульсів з періодичністю 1 с.

Припускається, що БЗВЧХС 24 формує на своєму виході цифровий код, що відповідає часу витримки між пусками двигуна з холодного стану; БЗВЧГС 26 – цифровий код, що відповідає часу витримки між пусками двигуна з гарячого стану; БЗДКПХС 32 – цифровий код, що відповідає допустимому числу пусків двигуна з холодного стану; БЗДКПГС 45 – цифровий код, що відповідає допустимому числу пусків двигуна з гарячого стану; БЗДКП 51 – цифровий код, що відповідає загальному допустимому числу пусків двигуна.

Як тільки на виході БЗ1 з'являється сигнал логічної одиниці, спрацьовують всі сенсори і сигнал з СНМ 2 подається на перший аналоговий компаратор 6. Якщо напруга мережі живлення обмотки статора асинхронного двигуна менша ніж 0,8 від номінального значення, то на виході першого аналогового компаратора 6 з'являється сигнал логічної одиниці. Поява сигналу логічної одиниці на виході першого логічного елемента АБО-НІ 9 означатиме, що напруга мережі більша або рівна за 0,8 від номінального значення напруги живлення двигуна. Сигнал з СТД 3 подається на другий аналоговий компаратор 7, який спрацьовує при перевищенні граничного значення температури двигуна. На виході другого логічного елемента АБО-НІ 10 з'являється сигнал логічної одиниці коли температура двигуна менша або рівна за граничне значення. Третій аналоговий компаратор 8, на перший вхід якого подається сигнал з СТД 3, а на другий вхід сигнал з СТНС 4 через підсилювач сигналу 5, спрацьовує тоді, коли температура двигуна більша ніж 1,03 температури навколишнього середовища, що вказуватиме на гарячий стан двигуна.

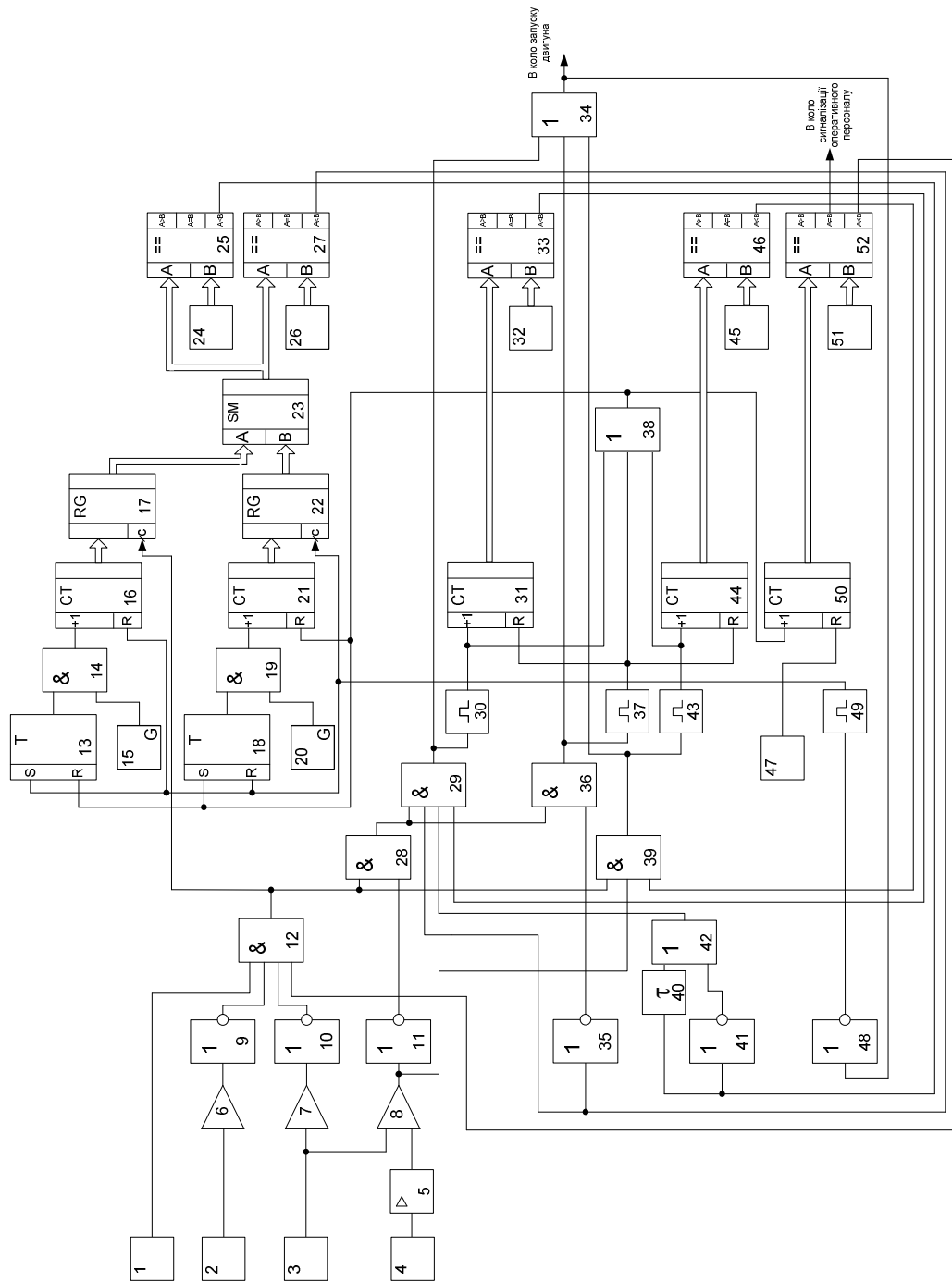


Рис. 4.12. Структурна схема пристрою керування запуском двигуна великої потужності

В іншому випадку, тобто коли температура двигуна буде меншою або рівною 1,03 температури навколишнього середовища, сигнал логічної одиниці з'явиться на виході третього логічного елемента АБО-НІ 11, а двигун знаходитиметься в холодному стані.

Частиною схеми, що містить блоки 50–52, здійснюється підрахунок загальної кількості запусків двигуна та порівняння їх з допустимим значенням. Цифровий код на виході п'ятого лічильника імпульсів 50 відповідає кількості пусків, які здійснив двигун. Якщо кількість пусків, які здійснив двигун, рівна загальному допустимому числу пусків двигуна, то сигнал логічної одиниці з виходу  $A = B$  п'ятого цифрового компаратора 52 подається в коло сигналізації оперативного персоналу. Якщо ж ця кількість менша за загально допустиме число пусків, то сигнал логічної одиниці з'являється на виході  $A < B$  п'ятого цифрового компаратора 52, і подається на четвертий вхід третього логічного елемента І 12. Таким чином на виході третього логічного елемента І 12 присутній сигнал логічної одиниці (сигнал дозволу) тільки тоді, коли подана команда з БЗ 1 на запуск двигуна, а напруга, температура та кількість пусків знаходяться в допустимих межах. При присутньому сигналі дозволу та якщо двигун знаходиться в холодному стані, спрацьовує четвертий логічний елемент І 28, якщо ж двигун знаходиться в гарячому стані, а кількість пусків з цього стану менша за допустиме число пусків двигуна з гарячого стану, то сигнал логічної одиниці з'являється на виході сьомого логічного елемента І 39.

У частині схеми, що містить блоки 13–16, здійснюється підрахунок часу паузи двигуна, а у частині схеми, що містить блоки 18–21 – часу роботи двигуна. В момент виникнення сигналу дозволу в перший регістр 17 записується цифровий код з виходу першого лічильника імпульсів 16, що відповідає часу паузи. В суматорі 23 час роботи з виходу другого регістра 22 сумується з часом паузи та загальний час між поточним та попереднім пуском з виходу суматора 23 подається на вхідні цифрові шини А першого 25 та другого 27 цифрових компараторів. Якщо час між поточним та попереднім запуском двигуна менший за час витримки між пусками двигуна з холодного стану, то на виході  $A < B$  першого цифрового компаратора 25 з'являється сигнал логічної одиниці, який надходить на вхід елемента затримки сигналу 40. Після затримки, рівній часу витримки між пусками двигуна з хо-

лодного стану, сигнал логічної одиниці через третій логічний елемент АБО 42 подається на третій вхід п'ятого логічного елемента І 29. В протилежному випадку, коли час між поточним та попереднім запуском двигуна більший або рівний часу витримки між пусками двигуна з холодного стану, сигнал логічної одиниці з виходу п'ятого логічного елемента АБО-НІ 41 через третій логічний елемент АБО 42 відразу надходить на третій вхід п'ятого логічного елемента І 29. Якщо час між поточним та попереднім запуском двигуна менший за час витримки між пусками двигуна з гарячого стану, то на виході  $A < B$  другого цифрового компаратора 27 з'являється сигнал логічної одиниці, який надходить на другий вхід п'ятого логічного елемента І 29. В іншому випадку сигнал логічної одиниці з виходу четвертого логічного елемента АБО-НІ 35 надходить на другий вхід шостого логічного елемента І 36. Таким чином, при присутньому сигналі дозволу в холодному стані двигуна та різниці часу між поточним та попереднім запуском, більший або рівний часу витримки між пусками двигуна з гарячого стану, на виході шостого логічного елемента І 36 з'являється сигнал логічної одиниці, який через перший логічний елемент АБО 34 подається в коло запуску двигуна, і через другий одновібратор 37 надходить на другий вхід другого логічного елемента АБО 38 та R-входи третього 31 та четвертого 44 лічильників імпульсів. При появі сигналу логічної одиниці на R-входах третього 31 та четвертого 44 лічильників імпульсів останні обнуляються. Імпульс з виходу другого логічного елемента АБО 38 обнуляє другий лічильник імпульсів 21, який підраховує час роботи двигуна, встановлює в одиницю вихід другого R-S тригера 18 та обнуляє вихід першого R-S тригера 13. Послідовність імпульсів з виходу другого генератора імпульсів 20 через другий логічний елемент І 19 надходить на додаючий вхід другого лічильника імпульсів 21. При обнуленні першого R-S тригера 13 припиняється надходження імпульсів з виходу першого генератора імпульсів 15 через перший логічний елемент І 14 на додаючий вхід першого лічильника імпульсів 16. Таким чином зупиняється відлік часу паузи двигуна. При зникненні сигналу запуску двигуна на виході шостого логічного елемента АБО-НІ 48 з'являється сигнал логічної одиниці, який через четвертий одновібратор 49 надходить на динамічний вхід друго-

го регістра 22, обнуляє вихід другого R–S тригера 18, обнуляє перший лічильник імпульсів 16 та встановлює в одиницю вихід першого R–S тригера 13. При цьому в другий регістр 22 записується час роботи двигуна, зупиняється відлік часу роботи та запускається відлік часу паузи двигуна.

Частини схеми, що містять блоки 30–33 та 43–46 призначені відповідно для підрахунку кількості запусків двигуна з холодного та гарячого станів. У випадку, коли кількість пусків з холодного стану менша за допустиме число пусків двигуна з холодного стану, на виході  $A < B$  третього цифрового компаратора 33 з'являється сигнал логічної одиниці, який подається на четвертий вхід п'ятого логічного елемента І 29, з виходу якого сигнал логічної одиниці прикладається і до першого входу першого логічного елемента АБО 34, і через перший одновібратор 30 до підсумовувального входу третього лічильника імпульсів 31 та першого входу другого логічного елемента АБО 38. Четвертий лічильник імпульсів 44 підраховує кількість пусків двигуна з гарячого стану. У випадку, коли кількість пусків двигуна з гарячого стану менша за допустиме число пусків двигуна з гарячого стану, на виході  $A < B$  четвертого цифрового компаратора 46 з'являється сигнал логічної одиниці, який подається на третій вхід сьомого логічного елемента І 39, з виходу якого сигнал логічної одиниці прикладається і до третього входу першого логічного елемента АБО 34, і через третій одновібратор 43 до підсумовувального входу четвертого лічильника імпульсів 44 та третього входу другого логічного елемента АБО 38. Таким чином, при кожному запуску на виході другого логічного елемента АБО 38 з'являється імпульс, який подається на підсумовувальний вхід п'ятого лічильника імпульсів 50. Якщо ресурс двигуна по кількості пусків вичерпано (у цей час в коло сигналізації оперативного персоналу подається сигнал), то його виводять з експлуатації. Пристрій керування запуском насосного агрегата при цьому обнуляють, використовуючи БОКП 47.



## 4.2. Мікропроцесорна реалізація пристрою керування запуском двигуна насосного агрегата

Структурна схема пристрою керування запуском НА показана на рис. 4.13 [5].

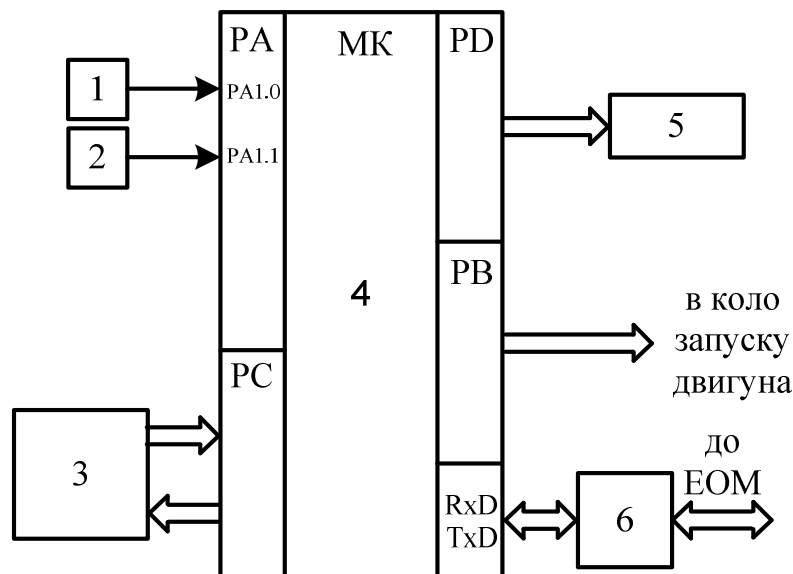


Рис. 4.13. Структурна схема пристрою керування запуском НА

На порт *A* (*PA*) мікроконтролера МК 4 поступає інформація з сенсора напруги мережі живлення 1 та сенсора температури 2. Через пристрій введення/виведення інформації 3 (клавіатуру) та порт *C* (*PC*) відбувається введення параметрів номінальної напруги живлення, граничного значення температури двигуна, допустимої кількості пусків з гарячого та холодного станів, допустимого інтервалу між пусками з холодного стану тощо.

Через програмований індикатор 5, який підключений до порта *D* (*PD*), відбувається сигналізація про стан системи. Мікроконтролер через виходи *RxD*, *TxD* та перетворювач рівнів сигналів 6 підключений до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). На виході системи (порт *B* мікроконтролера) формується керуючий сигнал, який надходить в коло запуску двигуна. Для роботи системи керування запуском НА станції водопостачання відповідно до системи логічних умов (4.2) та структури, показаної на рис. 4.12, побудовано алгоритм роботи мікроконтролера, який зображений на рис. 4.14.

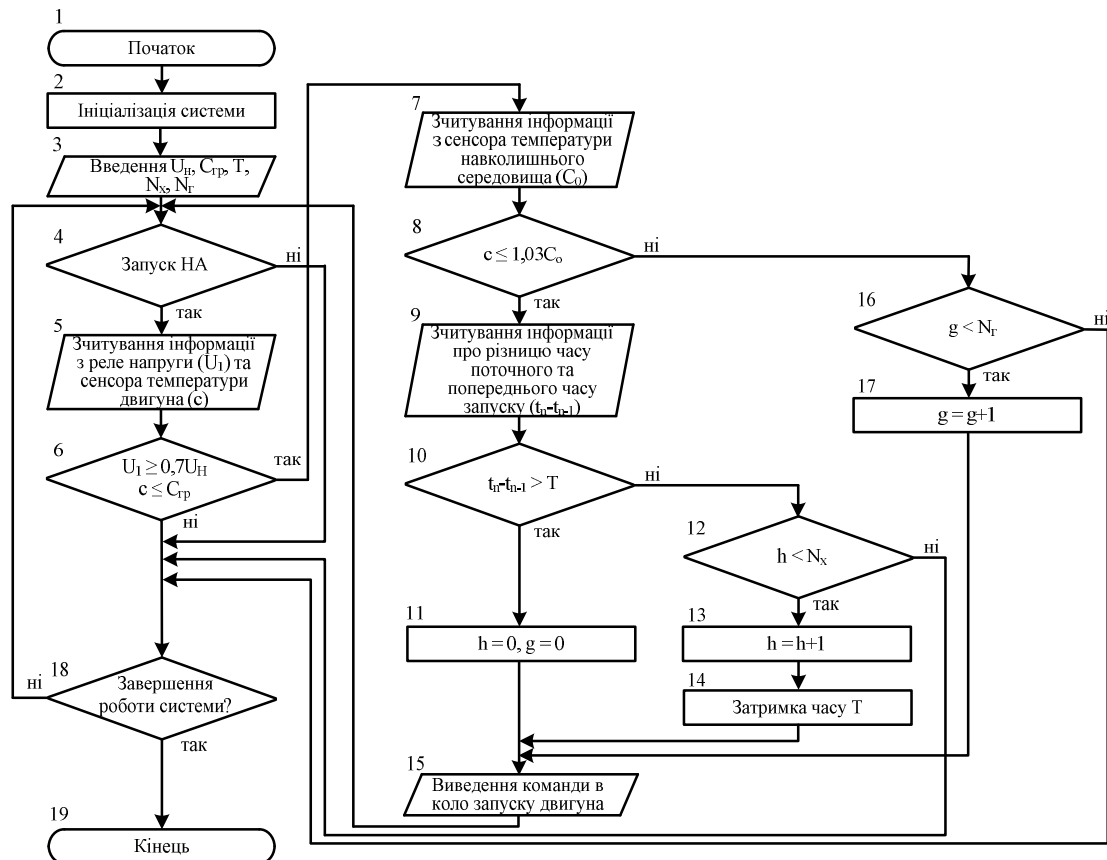


Рис. 4.14. Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою системи керування НА станції водопостачання

Зазначимо, що реалізувати запропоновану структуру можна на основі будь-якого сучасного мікроконтролера, наприклад AT90S8535 фірми Atmel [104].

Алгоритм містить такі складові:

- блоки 3 та 15 забезпечують введення діагностичної інформації та виведення команди в коло запуску двигуна;
- блоки 4, 5, 6 забезпечують перевірку системи на наявність команди запуску НА та допустимих значень напруги живлення і температури двигуна;
- блоками 7 та 8 визначається стан двигуна (холодний чи гарячий);
- блоками 9–14 забезпечується робота системи в холодному стані двигуна, а 16, 17 – в гарячому.

На основі обмежень, які накладаються на пуск двигунів великої потужності та запропонованої системи логічних умов, побудовано си-

стему керування прямим пуском приводного двигуна насоса, що дозволить підвищити надійність роботи станції водопостачання.

### 4.3. Пристрій керування регульованим насосним агрегатом

Пристрій керування насосною установкою пояснюється блок-схемою, зображеною на рис. 4.15 [105].

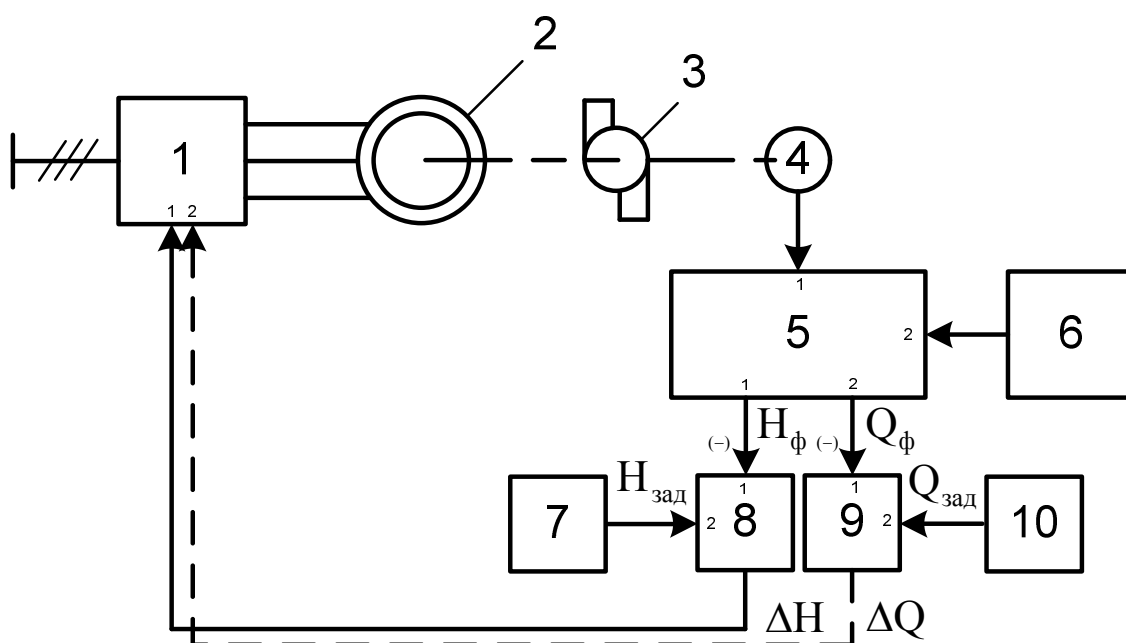


Рис. 4.15. Блок-схема пристрою керування насосною установкою

На рис. позначено: 1 – перетворювач для живлення силового кола двигуна; 2 – асинхронний двигун; 3 – відцентровий насос; 4 – сенсор швидкості; 5 – обчислювальний блок; 6 – блок задання конструктивних і енергетичних параметрів відцентрового насоса та параметрів мережі споживача; 7 – задавач тиску, 8, 9 – відповідно перший та другий суматори; 10 – задавач подачі.

Алгоритм роботи обчислювального блока показаний на рис. 4.16.

Запропонований пристрій працює так.

Відповідно до сигналів керування на керуючих входах перетворювача для живлення силового кола двигуна 1 на його виходах форму-

ється трифазна напруга певної величини та частоти, яка подається на трифазну обмотку статора асинхронного двигуна 2.

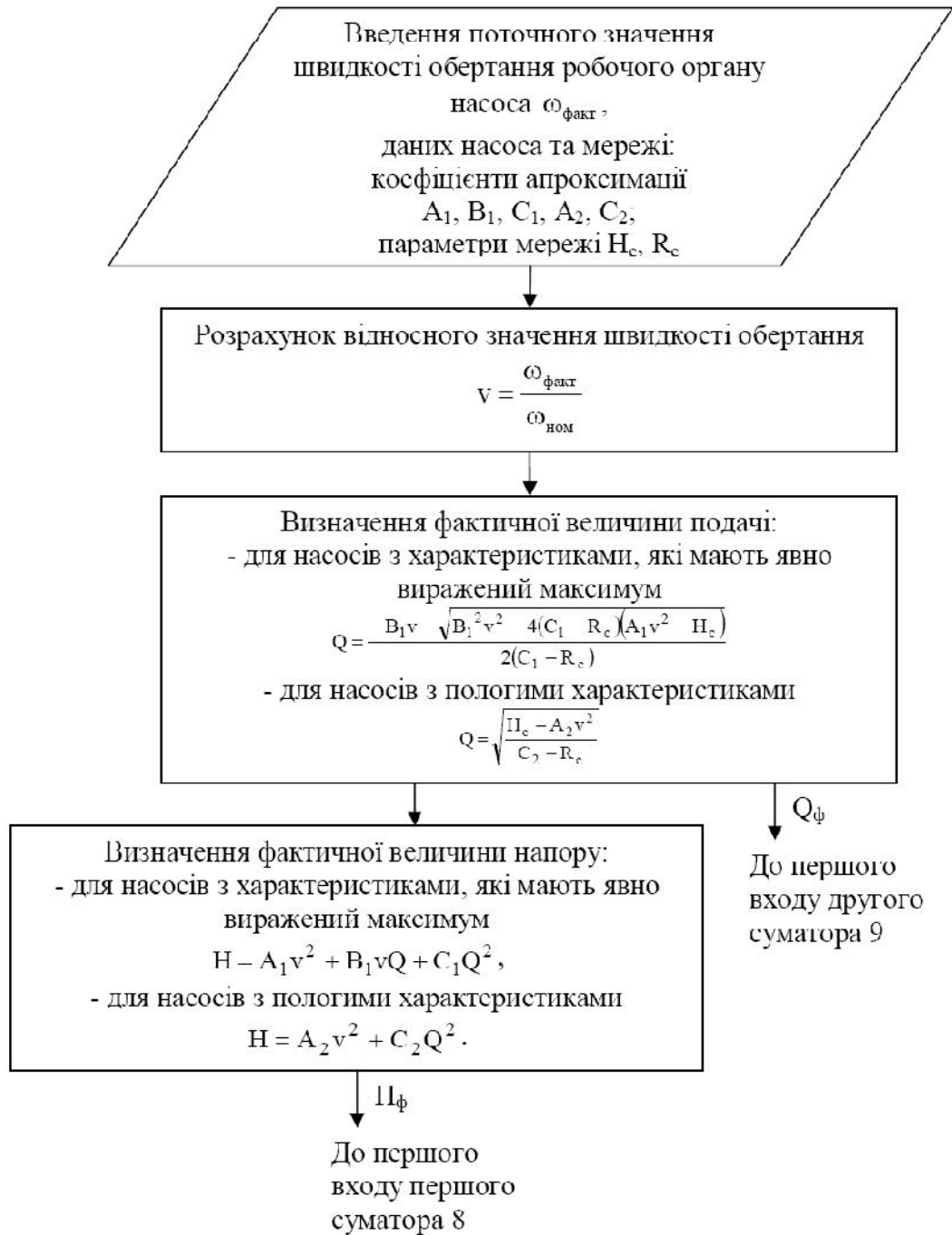


Рис. 4.16. Алгоритм роботи обчислювального блока пристрою для забезпечення потрібного значення продуктивності НА

Відповідно до цієї напруги асинхронний двигун 2 розганяє робоче колесо відцентрового насоса 3 до певної швидкості обертання. На ви-

ході сенсора швидкості 4 формується сигнал, пропорційний швидкості обертання робочого колеса відцентрового насоса 3, який подається на перший вхід обчислювального блока 5, на другий вхід якого подаються сигнали, пропорційні конструктивним і енергетичним параметрам відцентрового насоса та параметрам мережі споживача з блока задання конструктивних і енергетичних параметрів відцентрового насоса та параметрів мережі споживача 6. Обчислювальний блок 5 призначений для визначення фактичних значень напору  $H_{\phi}$  та подачі  $Q_{\phi}$  насосної установки.

Рівняння  $H(Q)$  відцентрового насоса залежить від вигляду напірних характеристик, які для відцентрових насосів, що мають характеристики з явно визначеним максимумом, представляються виразом (2.16), а для відцентрових насосів з пологими характеристиками – виразом (2.17). Характеристика мережі споживача описується рівнянням (2.18).

В точці робочого режиму відцентрового насоса додержується рівність напорів, що дозволяє, прирівнявши праві частини рівнянь (2.16) та (2.18) або (2.17) та (2.18), отримати вирази  $Q = f(v)$ :

– для відцентрових насосів з характеристиками, що мають максимум

$$Q = \frac{-B_1 v - \sqrt{B_1^2 v^2 - 4(C_1 - R_c)(A_1 v^2 - H_c)}}{2(C_1 - R_c)}; \quad (4.14)$$

– для відцентрових насосів з пологими характеристиками

$$Q = \sqrt{\frac{H_c - A_2 v^2}{C_2 - R_c}}. \quad (4.15)$$

Другий корінь рівняння (2.16) зі знаком «+» перед дискримінантом відкидається, через те, що він дає негативне значення подачі.

Підставивши  $v$  у вирази (4.14) або (4.15), отримаємо фактичне значення подачі насосної установки  $Q_{\phi}$ . Знаючи  $Q_{\phi}$ , легко визначити, використовуючи рівняння (2.16), (2.17), величину фактичного значення напору  $H_{\phi}$  відцентрового насоса.

В пристрої керування передбачена можливість зворотного зв'язку за напором та зворотного зв'язку за подачею (пунктирна лінія на

рис. 4.15), що реалізуються шляхом введення суматорів 8 і 9.

Сигнал  $H_{\phi}$  надходить з першого виходу обчислювального блока 5 на перший вхід першого суматора 8, на другий вхід якого подається сигнал задання  $H_{\text{зад}}$  з виходу задавача тиску 7. Якщо необхідний тиск (напір) перевищить фактичне значення, то сигнал зворотного зв'язку  $\Delta H = H_{\text{зад}} - H_{\phi}$ , який подається на перший керуючий вхід перетворювача для живлення силового кола двигуна 1, буде сприяти збільшенню швидкості обертання асинхронного двигуна 2. Процес регулювання буде відбуватися до тих пір, доки заданий і фактичний сигнали не стануть рівними. Якщо  $H_{\text{зад}} < H_{\phi}$ , то сигнал зворотного зв'язку буде негативним, і це приведе до зниження швидкості обертання.

Процес регулювання може здійснюватися також за рахунок порівняння заданого і фактичного сигналу подачі насосної установки. Сигнал  $Q_{\phi}$  надходить з другого виходу обчислювального блока 5 на перший вхід другого суматора 9, на другий вхід якого подається сигнал задання  $Q_{\text{зад}}$  з виходу задавача подачі 10. В разі, якщо необхідна величина подачі перевищує фактичну, то сигнал  $\Delta Q = Q_{\text{зад}} - Q_{\phi}$ , який подається на другий керуючий вхід перетворювача для живлення силового кола двигуна 1 буде направлений на збільшення частоти обертання асинхронного двигуна. Якщо  $Q_{\text{зад}} < Q_{\phi}$ , то сигнал зворотного зв'язку буде негативним і це приведе до зниження швидкості обертання. Процес регулювання буде відбуватися до тих пір, доки заданий і фактичний сигнали не стануть рівними.

## ВИСНОВКИ

У монографії подано теоретичне узагальнення і нове вирішення наукового питання, щодо зменшення споживання електричної енергії двигунами насосів, що працюють паралельно, станції водопостачання при забезпеченні змінних протягом доби потреб споживача у воді та врахуванні обмежень на прямий пуск двигунів середньої і великої потужностей. При цьому отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. При визначенні кількості працюючих насосів для забезпечення потрібного значення продуктивності в кожному годину доби, запропоновано враховувати спожиту двигунами насосів електричну енергію, тривалість безперервної роботи агрегатів та кількість реалізованих їхніми двигунами прямих пусків. Це дає можливість зменшити споживання електричної енергії та продовжити термін роботи системи водопостачання за рахунок рівномірного розподілу між двигунами насосів ресурсу за тривалістю роботи та кількістю прямих пусків.

2. Отримано закон зміни швидкості обертання електроприводу регульованого насосного агрегата (залежність (2.37)), який дозволяє досягти точного значення продуктивності групи насосів, що працюють паралельно. При цьому враховано характеристики насосів, мережі споживача та різницю між номінальними швидкостями насоса та двигуна.

3. Увімкнення чи вимкнення чергового насосного агрегата, у групі насосів, що працюють паралельно, повинно відбуватися, коли продуктивність регульованого агрегата дорівнює нулю. Це забезпечує уникнення ділянок роботи, на яких спрацьовує зворотний клапан регульованого насоса. Спрацювання зворотного клапана призводить до додаткових гідравлічних ударів в трубопроводі та негативно проявляється на показниках надійності насосного устаткування.

4. Розроблено метод оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання, який полягає у виборі комбінацій увімкнених насосів та значення швидкості обертання двигуна одного з них, при яких забезпечується потрібне значення продуктивності, зменшення споживання електричної енергії, продовження терміну роботи обладнання. Метод може бути використаний для НС, яка складається з двох і більше НА, характеристики яких можуть відрізнятися.

5. Розроблено математичну модель системи керування запуском двигуна середньої та великої потужності, яка враховує обмеження на кількість прямих пусків, температуру статорної обмотки, напругу живлення під час пуску та в процесі експлуатації.

6. Синтезовано структуру пристрою керування запуском двигуна середньої та великої потужності, яка враховує обмеження на кількість прямих пусків, температуру статорної обмотки, напругу живлення під час пуску та в процесі експлуатації. Пристрій, побудований за розробленою структурою, може бути використаний для пуску асинхронних і синхронних двигунів середньої та великої потужності. Застосування його для насосних агрегатів дозволить підвищити надійність прямого запуску двигунів насосів та уникнути аварійних режимів роботи через зрив запуску одного з насосів, що працюють паралельно.

7. Запропоновано мікропроцесорну реалізацію розробленої структури пристрою на мікроконтролері фірми Atmel. Розроблено алгоритм роботи пристрою, який дозволить забезпечити керування двигунами нерегульованих НА. Для керування регульованим агрегатом розроблено структуру пристрою керування насосною установкою, яка дозволить підтримувати точне значення тиску чи продуктивності на виході насоса по швидкості обертання його робочого колеса. Запропонована структура дозволяє замінити установлені на агрегаті сенсори тиску та продуктивності на більш надійні та точні сенсори швидкості обертання; зменшити вартість системи керування; підвищити точність регулювання.

8. Запропоновано модель ВН, яка враховує характеристику відцентрового насоса, що має максимум, та затримку в часі між моментом прикладення певного значення швидкості обертання робочого колеса та моментом, коли на виході з'являється відповідне йому значення продуктивності. Побудовано модель паралельної роботи НА двох типів на МВ, яка враховує те, що тиск в трубопроводі визначатиметься параметрами трубопроводу та сумарною продуктивністю НА.

9. Отримані результати оптимізації роботи ЕП НС випробувано на розробленій комп'ютерній моделі і отримано ефективність запропонованого вирішення, яка становить більше 19 кВт потужності на добу. Відносна похибка забезпечення потрібного значення продуктивності при цьому не перевищує 1,5 %.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Мошнорізі М. Вдосконалення роботи насосної станції водопостачання / Микола Мошнорізі, Володимир Грабко // Автоматика–2006: міжнар. наук.-техн. конф., 25–28 вересня 2006 р. : тези доповідей. – Вінниця, 2006. – С. 124.
2. Состояние рынка оборудования в Украине // Мир техники и технологий. – 2004. – № 8. – С. 20–27.
3. Карелин В. Я. Насосы и насосные станции : учеб. для вузов ; 2-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – М. : Стройиздат, 1986. – 320 с.
4. Коренькова Т. В. Рациональный электропривод насосных станций городского водоснабжения : дис...канд. техн. наук : 05.09.03 / Коренькова Т. В. – К., 2001. – 155 с.
5. Мошнорізі М. Система керування запуском насосного агрегата станції водопостачання / Микола Мошнорізі, Володимир Грабко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – Випуск 30. – С. 310–311.
6. Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики. Общие технические условия (ISO 29.160.30) : ГОСТ Р 51137–98. – [Чинний від 1998-02-19]. – М. : Госстандарт России, 1998. – 15 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
7. Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В для механизмов собственных нужд тепловых электростанций. Общие технические условия (ISO 29.160.30) : ГОСТ Р 51757–2001. – [Чинний від 2001-06-07]. – М. : Госстандарт России, 2001. – 11 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
8. Пат. 39795 Україна, МПК G 07 C 3/00. Пристрій керування запуском насосного агрегата / Грабко В. В., Мошнорізі М. М.; заявник і патентотримач Вінницький національний технічний університет. – № U200812464; заявл. 23.10.08 ; опубл. 10.03.09, Бюл. № 5.
9. Онищенко Г. Б. Автоматизированные насосные станции нового поколения [Электронный ресурс] / Г. Б. Онищенко, А. Н. Хаткин, Ю. Н. Калачев // Экологические системы. – 2004. – № 11. Режим доступа до статті: [http://esco-ecosys.narod.rU/2004\\_11/art34.htm](http://esco-ecosys.narod.rU/2004_11/art34.htm).

10. Энергосбережение в насосных установках / [Б. С. Лезнов, В. Б. Чебанов, Я. Н. Гинзбург и др.] // Промышленная энергетика. – 1999. – №7. – С. 13–16.

11. Гинзбург Я. Л. Современные методы регулирования режимов работы систем водоснабжения крупных городов / Я. Л. Гинзбург, Б. С. Лезнов. – М. : ГОСИНТИ, 1976.

12. Гриценко К. Г. Способ решения задачи реконструкции электроприводов насосов насосной станции с использованием имитационной модели / К. Г. Гриценко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2000. – Вип. 2(9). – С. 10–16.

13. Лезнов Б. С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Лезнов Б. С. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

14. Залуцкий Э. В. Насосные станции. Курсовое проектирование / Э. В. Залуцкий, Д. И. Петрухно. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 167 с.

15. Аршенский Н. Н. Переходные процессы крупных насосных станций / Н. Н. Аршенский, Б. В. Поспелов. – М. : Энергия, 1980. – 112 с.

16. Петросов В. А. Стійкість водопостачання / Петросов В. А. – Х. : Фактор, 2007. – 360 с.

17. Кривченко Г. И. Гидравлические машины: Турбины и насосы. / Г. И. Кривченко. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

18. Мамалыга В. Методология выбора параметров насосных установок / В. Мамалыга, В. Верланов // Технічна електродинаміка. – 2004. – №3. – С. 56–61.

19. Дмитриева В. Д. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения : Справочник / В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 383 с.

20. Сотник М. І. Аналіз способів регулювання роботи насосних станцій комунального водопостачання / М. І. Сотник, С. О. Хованський, О. І. Дужак // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – №2. – С. 152–157.

21. Соколовський О. Ф. Електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок при енерго- та ресурсоощадливому керуванні : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн.

наук : спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси і системи» / О. Ф. Соколовський. – К., 2009. – 19 с.

22. Ильинский Н. Ф. Энергосберегающий электропривод насосов / Ильинский Н. Ф. // Электротехника. – 1995. – № 7. – С. 3–8.

23. Мисюренко В. А. Имитационная модель электромеханической системы для управления группой насосов / В. А. Мисюренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2002. – Т. 2, №12. – С. 142–145.

24. Шерстюк А.Н. Насосы, вентиляторы и компрессоры : учеб. пособие для вузов / Шерстюк А. Н. – М. : Высшая школа, 1972. – 344 с.

25. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учебник для машиностроительных вузов / [Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

26. Раабе И. Гидравлические машины и установки / Раабе И. ; пер. с нем. – М. : Энергия, 1974. – 310 с.

27. Степанов А. И. Центробежные и осевые насосы / Степанов А. И. – М. : Машиностроение, 1960. – 463 с.

28. Степанов Н. Н. Гидравлические машины / Степанов Н. Н. – К. : Высшая школа, 1978. – 152 с.

29. Коренькова Т. Обоснование необходимости повышения управляемости насосных комплексов / Татьяна Коренькова, Юлия Алексеева // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3(38), Ч. 1. – Кременчук : КДПУ, 2006. – С. 87–90.

30. Алексеева Ю. Техническое состояние и технологии управления насосными комплексами коммунального хозяйства / Юлия Алексеева, Татьяна Коренькова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3(50), Ч. 1. – Кременчук : КДПУ, 2008. – С. 135–141.

31. Онищенко Г. Б. Электропривод турбомеханизмов. / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юньков. – М., Энергия, 1972. – 277 с.

32. Дмитриенко Ю. А. Регулируемый электропривод насосных агрегатов / Дмитриенко Ю. А. – Кишинев : Штиинца, 1985.

33. Загорский А. Е. Электродвигатели переменной частоты / Загорский А. Е. – М. : Энергия, 1975.

34. Экспериментальная насосная установка для оценки показателей эффективности регулирования параметров турбомеханизмов / Д. А. Михайличенко, Т. В. Коренькова, А. Л. Перекрест, С. Н. Бойченко. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – 2(19). – С. 83–92.

35. Михайлов А. К., Малющенко В. В. Лопастные насосы / А. К. Михайлов, В. В. Малющенко. – М. : Машиностроение, 1977. – 288 с.

36. Онищенко Г. Б. Электропривод турбомеханизмов / Г. Онищенко, М. Юньков. – М. : Энергия, 1972. – 277 с.

37. Поляков В. В., Скворцов Л. С. Насосы и вентиляторы : учебник [для вузов] / В. В. Поляков, Л. С. Скворцов. – М. : Стройиздат, 1990. – 336 с.

38. Хомяк Б. В. Обоснование режимов работы автоматизированных каналов с насосными станциями и перегораживающими сооружениями: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / Б. В. Хомяк. – К., 1986. – 20 с.

39. Искендеров А. А. Задачи выбора оптимальных режимов работы НС / А. А. Искендеров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – №5. – С. 62–64.

40. Искендеров А. А. Расчет оптимальных режимов работы насосных станций / А. А. Искендеров // Изв. АН Азерб. – 2003. – № 3. – С. 87–90.

41. Попович М. Г. Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2002. – №12. – С. 37–41.

42. Попович Н. Г. Электромеханические системы автоматизации и задача энергосбережения / Н. Г. Попович, Н. В. Печеник // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – 2000. – № 113. – С. 297–300.

43. Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи з асинхронним електроприводом / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. В. Ковальчук, О. І. Кіселичник // Вісник Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут». – 2001. – Вип. 10. – С. 314–318.

44. Особливості організації екстремальних енергозберігаючих систем при різних методах керування асинхронних електроприводів / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник, О. В. Ковальчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вип. 1 (12). – С. 129–132.

45. Гриценко К. Г. Энергоэффективное управление системой городского водоснабжения / К. Г. Гриценко // Вісник КДПУ. – 2006. – № 3 (38), Ч. 1. – С. 37–41.

46. Пат. 2274943 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 5/46. Способ управления режимом работы электродвигателей магистральных насосов нефтеперекачивающей станции магистрального нефтепровода / Гаспарянц Р. С., Игнатов И. А., Минеев А. Р., Пестряков В. М., Славов Г. Г., Дмитриев И. Ю., Минеев Р. В. ; заявитель и патентообладатель Гаспарянц Р. С., Игнатов И. А., Минеев А. Р., Пестряков В. М., Славов Г. Г., Дмитриев И. Ю., Минеев Р. В. – № 2004125100/09 ; заявл. 18.08.04.

47. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи : навч. посібн. / Казачковський М. М. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.

48. Костюков В. Н. Российский опыт автоматической диагностики и мониторинга насосно-компрессорного и насосного оборудования на базе систем «Компакс» / В. Н. Костюков, С. Н. Бойченко, А. В. Костюков // Безопасность эксплуатации компрессорного и насосного оборудования. – М., 2001. – С. 154–171.

49. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.

50. Машины электрические. Машины электрические большой мощности. Электродвигатели асинхронные : справочник. – М., 1990. – 182 с. (Всесоюзный научно-исследовательский институт стандартизации в электротехнической промышленности ВНИИ стандартэлектро).

51. Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В. Общие технические условия : ГОСТ 9630–80. – [Чинний від

1982-01-01]. – Издательство стандартов, 1987. – 9 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).

52. Reheis H. F. Energy conservation in municipal water systems / H. F. Reheis. – OpFlow. Denver : USA. 1984.

53. А. с. 1084847 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 07 C 3/10. Устройство для определения ресурса машин / А. В. Рассказчиков, В. А. Савельев (СССР). – № 3518585/18 – 24 ; заявл. 08.12.82 ; опубл. 07.04.84, Бюл. № 13.

54. Пат. 16125 Україна, МПК G 07 C 3/10. Пристрій для контролю електричного двигуна / Мокін Б. І., Грабко В. В., Розводюк М. П., Жуков С. О.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200602168 ; заявл. 27.02.2006 ; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

55. Мошноріз М. Оптимізація режимів роботи насосної станції водопостачання / Микола Мошноріз, Георгій Горячев // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації : Всеукраїнська наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів, 19–21 квітня 2006 р. : тези доповідей. – К., 2006. – С. 35.

56. Мошноріз М. М. Розробка математичних моделей та пристроїв для оптимізації керування насосною станцією: дис. ... магістра технічних наук : 8.092203 / Мошноріз Микола Миколайович. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 100 с.

57. Мошноріз М. Вдосконалення роботи насосної станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №6. – С. 138–141.

58. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В. М. Черкасский ; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

59. Кривченко Г. И. Гидравлические машины: турбины и насосы : учебник для вузов / Г. И. Кривченко – М. : Энергия, 1978. – 320 с.

60. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М. : Академия, 2007. – 576 с.

61. Абрамов Н. Н. Водоснабжение : учебник для вузов / Н. Н. Абрамов ; изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1974. – 480 с.

62. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : СНиП 2.04.02–84 / Государственный проектный институт «Союзводоканалпроект» Госстроя СССР ; утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 27 июля 1984 г. № 123. – [Введен в действие от 1985.01.01]. – М. : Госстрой СССР, 1985.

63. Канализация. Наружные сети и сооружения : СНиП 2.04.03–85 / Государственный проектный институт «Союзводоканалпроект» Госстроя СССР ; утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 21 мая 1985 г. № 71. – [Введен в действие от 1986.01.01]. – М. : Госстрой СССР, 1986.

64. Внутренний водопровод и канализация зданий : СНиП 2.04.01–85 / Государственный проектный институт «Сантехпроект» Госстроя СССР ; утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 4 октября 1985 г. № 189 – [Введен в действие от 1986.07.01]. – М. : Госстрой СССР, 1986.

65. Майзельс М. П. Величина удельного водопотребления в жилых зданиях в зависимости от влияющих факторов / М. П. Майзельс, М. А. Мордясов // Водопотребление и вопросы проектирования, эксплуатации систем коммунального водоснабжения. – М. : ОНТИ АКХ, 1978. – С. 3–18.

66. Вербицкий А. С. Интегральные функции распределения расходов воды. Инженерное обеспечение строительства / А. С. Вербицкий, А. Л. Лякмунд // Экспрессинформация. – М. : ВНИИИС, 1986. – Вып. 2. – С. 2–10.

67. Справочник по электрическим машинам : в 2-х т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 1988. – 456 с.

68. Насосы, которые экономят электроэнергию [Электронный ресурс] / В. Гилевич // Строительство и недвижимость. – 2004. – № 30. – Режим доступа до журн. : <http://www.nestor.minsk.by/sn/2004/30/sn43005.html>.

69. Оценка стоимости жизненного цикла оборудования. Экономическая эффективность в долгосрочной перспективе : информационная брошюра компании EMU Technologie [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн. : [http://www.wilo.de/cps/rde/xbcr/ua-ru/UA\\_PRESS\\_LCC.pdf](http://www.wilo.de/cps/rde/xbcr/ua-ru/UA_PRESS_LCC.pdf)

70. Баса Г. М. Водоснабжение. Технико-экономические расчеты / Баса Г. М. – К. : Высшая школа, 1977. – 152 с.

71. Шлипченко З. С. Насосы, компрессоры и вентиляторы / Шлипченко З. С. – К. : Техніка. – 1976. – 368 с.

72. Коренькова Т. В. Определение степени загрузки двигателей параллельно работающих насосов при регулировании скорости изменением питающего напряжения / Т. В. Коренькова // Проблеми створення нових машин і технологій. – 1999. – Вип. 2.

73. Хом'юк І. В. Математичне програмування. Ч. 1 : навч. пос. / І. В. Хом'юк, В. Л. Карпенко, В. В. Хом'юк. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 78 с.

74. Коренькова Т. В. Описание характеристик насосных агрегатов при переменной скорости вращения / Т. В. Коренькова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вип. 1(12). – С. 184–189.

75. Коренькова Т. В. Об определении эффективности энергосбережения в системах водоснабжения / Т. В. Коренькова // Проблеми створення нових машин і технологій. – 1999. – Вип. 1. – С. 186–189.

76. Мошноріз М. М. Визначення оптимального співвідношення продуктивностей насосних агрегатів станції для забезпечення їх сумісної роботи / М. М. Мошноріз // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 69–73.

77. Коренькова Т. В. Технико-экономическая оценка эффективности использования системы ТРН–АД в электроприводе насосных установок / Т. В. Коренькова // Проблеми створення нових машин і технологій. – 2001. – Вип. 2. – С. 98–101.

78. Гинзбург Я. Л., Лезнов Б. С. Современные методы регулирования режимов работы систем водоснабжения крупных городов / Я. Л. Гинзбург, Б. С. Лезнов. – М. : ГОСИНТИ, 1976.

79. Мошноріз М. Підвищення ефективності керування насосними агрегатами станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 3(50). Частина 1. – С. 145–148.



80. Сердюк А. Особенности моделей водопроводных насосных комплексов / Александр Сердюк, Татьяна Коренькова // Вісник КДПУ. – 2007. – Випуск 4 (44). – С. 143–147.

81. Коренькова Т. В. Концепция управляемости гидротранспортного комплекса / Т. В. Коренькова, В. Г. Рожко // Вісник КДПУ. – 2008. – Випуск 3 (50), Ч. 2. – С. 29–36.

82. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, та ін. – К. : Кременчук, 2001. – 410 с.

83. Чиликин М. Г. Основы автоматизированного электропривода : учебное пособие для вузов / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1974. – 568 с.

84. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями : учебное пособие / А. А. Усольцев. – М. : СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

85. Башарин А. В. Управление электроприводами : учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

86. Моделювання електромеханічних систем : методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» для студентів спеціальності 7.0922.03 «Електромеханічні системи автоматизації і електропривод» / Укл.: О. І. Толочко, Г. С. Чекавський, Р. В. Федоряк, О. В. Песковатська, В. Ю. Марінічев. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – 72 с.

87. Сандлер А. Б. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. Б. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М. : Энергия, 1974. – 328 с.

88. Соколов М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов / М. М. Соколов. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

89. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М. : Академия, 2006. – 272 с.

90. Кінесенія В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под. ред. В. А. Кінесеніі, А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

91. Елисеева В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
92. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Багата, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.
93. Альтшуль Л. Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / Л. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – М. : Стройиздат, 1965. – 274 с.
94. Аракелян А. К. Коммуникационная сеть как объект управления в системах регулируемого электропривода турбомеханизма / А. К. Аракелян, В. К. Тытюк // Межвузовский сб. науч. трудов. – Чебоксары : Изд. Чувашского ун-та. – 1991. – С. 64–75.
95. Проскура Г. Ф. Гидродинамика турбомашин / Г. Ф. Проскура. – К. : Машгиз, 1954. – 417 с.
96. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – М. : Наука. – 1975. – 568 с.
97. Вишневский К. П. Переходные процессы в напорных системах водопдачи / К. П. Вишневский. – М. : Агропромиздат, 1986. – 135 с.
98. Мошноріз М. Розробка моделі системи керування насосною станцією другого підйому [Електронний ресурс] / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2007. – №1. Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07mmmtsa.pdf>.
99. Русин Ю. С. Проектирование индуктивных элементов приборов / Ю. С. Русин, А. М. Чепарухин. – Л. : Машиностроение, 1981. – 171 с.
100. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью / В. Н. Захаров. – М. : Энергия, 1975. – 136 с.
101. Мошноріз М. М. Синтез структури пристрою керування запуском двигуна великої потужності / М. М. Мошноріз // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Осроградського. – 2009. – Випуск 4 (57), Ч. 1. – С. 36–39.

102. Тетельбаум И. М. Практика аналогового моделирования динамических систем : справочное пособие / И. М. Тетельбаум, Ю. Р. Шнейдер. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

103. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы : справочник / С. В. Якубовский, Л. И. Ниссельсон, В. И. Кулешова и др. ; под ред. С. В. Якубовского. – М. : Радио и связь, 1990. – 496 с.

104. Голубцов М. С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному / М. С. Голубцов.– М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 288 с.

105. Пат. 28955 Україна, МПК<sup>8</sup> F 04 D 15/00. Пристрій керування насосною установкою / Грабко В. В., Мошноріз М. М.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200709994; заявл. 06.09.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21.

106. Вольдек А. И. Электрические машины : учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / Вольдек А. И. ; изд. 2-е, перераб и доп. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.

107. Типовой электропривод промышленных установок / [С. А. Волотковский, В. И. Емец, В. К. Козло и др.]. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 312 с.

108. Москалено Е. Г. Исследование работы шахтных водоотливных установок при переходных процессах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня магістра техн. наук : спец. Експлуатація машин і електроустановок горного виробництва / Е. Г. Москалено. – Донецьк, 2003.

109. Тимошенко Г. Г. Научные основы проектирования и эксплуатации насосных установок в переходных режимах / Тимошенко Г. Г. – Донецк : Высшая школа, 1986. – 127 с.

110. Крупные осевые и центробежные насосы. Монтаж, эксплуатация и ремонт : справочное пособие. – М. – Машиностроение, 1977. – 184 с.

111. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

*Наукове видання*

**Грабко Володимир Віталійович  
Мошноріз Микола Миколайович**

**МЕТОД ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ  
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ  
ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено М. Мошнорізом

Підписано до друку 29.08.2011 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 7,97  
Наклад 100 прим. Зам № 2011-138

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.