

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



1898

Енергетичний аудит насосних систем

Методичні вказівки ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ



Київ-2008

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Енергетичний аудит насосних систем

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи 2
для студентів спеціальностей
7.000008 «Енергетичний менеджмент»
та 7.090603 «Енергетичні системи
електроспоживання» усіх форм навчання

Затверджено Методичною радою НТУУ «КПІ»

Київ
НТУУ «КПІ»
2008

Енергетичний аудит насосних систем [Текст] : метод. вказівки до викон. лаборатор. роботи 2 для студ. спец. 7.000008 «Енергетичний менеджмент» та 7.090603 «Енергетичні системи електроспоживання» усіх форм навчання / Уклад.: В. В. Прокопенко, О. О. Закладний, П. В. Кульбачний та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 64 с.

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 8 від 24.04.2008 р.)*

Навчальне видання

Енергетичний аудит насосних систем

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи 2
для студентів спеціальностей
7.000008 «Енергетичний менеджмент»
та 7.090603 «Енергетичні системи
електроспоживання» усіх форм навчання

Укладачі: *Прокопенко Володимир Васильович, канд. техн. наук, доц.
Закладний Олег Олександрович
Кульбачний Павло Вікторович
Степанова Віра Іванівна*

Відповідальний редактор *М. М. Федосенко, канд. техн. наук*

Рецензент *Є. І. Алтухов, канд. техн. наук*

*За редакцією укладачів
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Темплан 2008 р., поз. 2-037

Підп. до друку 28.05.2008. Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 3,72. Обл.-вид. арк. 6,18. Зам № 8-139. Наклад 65 пр.

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15
тел./факс (044) 241-68-78

Мета роботи: Ознайомитись з методикою проведення енергетичного аудиту насосних систем, отримати практичні навички енергоаудитора.

1. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Загальні відомості про насосні установки

Насоси – це машина, яка призначена для створення потоку рідкого середовища. Насос, транспортуючи рідину, виконує роботу за рахунок енергії, отриманої від двигуна. Ця енергія за винятком втрат передається насосом рідині.

До основного устаткування насосних установок належать насоси, їх приводи насосів (електродвигуни, двигуни внутрішнього згорання), а також трубопроводи з регулюючою та запірною арматурами.

На сучасних насосних установках найбільшого поширення одержали лопатні насоси: відцентрові й осьові.

Відцентрові насоси. В середині нерухомого корпусу 1 (рис. 1), що має спіральну форму, знаходиться робоче колесо 2, закріплене на валу 3. Колесо 2 складається із двох дисків, між якими розташовані лопасті 4. Корпус насоса з'єднаний зі всмоктувальним і напірним трубопроводами патрубками 5 й 6. Якщо корпус насоса і його всмоктувальний трубопровід наповнити рідиною, а потім привести в обертання робоче колесо, то рідина під дією лопастей робочого колеса починає обертатися. Відцентрові сили переміщують рідину на периферію, де створюється підвищений тиск, а в центрі колеса розрідження. За рахунок цієї різниці тисків рідина надходить у напірний трубопровід. Так здійснюється безперервна подача рідини насосом.

Під час роботи насоса під дією потоку води диск повертається на осі, й вода проходить через засувку. Після зупинки насоса диск під дією власної ваги й тиску води з боку напірного водопроводу опускається, й засувка закривається.

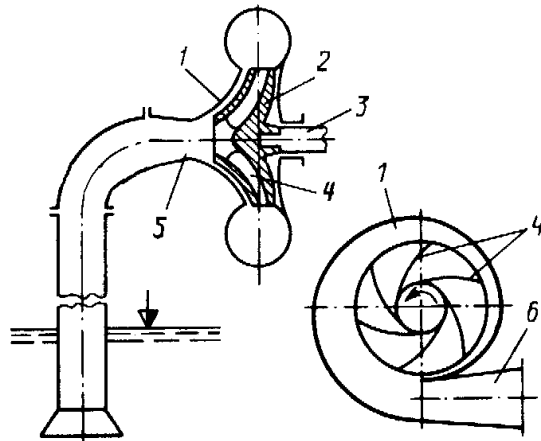


Рис. 1 Схема одноступінчастого відцентрового насоса

Відцентрові насоси можуть бути, як одноступінчастими (з одним робочим колесом), так і багатоступінчастими (з декількома колесами). Конструктивно в залежності від розташування валу вони поділяються на горизонтальні та вертикальні насоси.

Осьові насоси. Робоче колесо обертається у сферичній камері. Під час дії лопастей робочого колеса на рідину за рахунок зміни швидкості течії тиск над лопастью збільшується, а під нею зменшується. Завдяки різниці тисків рідина переміщується уздовж осі насоса.

Осьові насоси виготовляють двох типів: з жорстко закріпленими лопастями робочого колеса (типу О) та з поворотними лопастями (типа ОП). Насоси обох типів можуть бути в двох виконаннях: Г – з горизонтальним валом, В – з вертикальним.

Робоче колесо осьових насосів типу ОП складається з втулки обтічної форми, на якій закріплені поворотні лопасті. Можливість зміни кута установки лопастей дозволяють регулювати подачу та напор насоса у широких межах при збереженні високих значень ККД.

1.2 Вивчення й аналіз роботи насосних систем

Корисною роботою, здійсненою насосною системою залежно від її функціонального призначення, є подача, видалення, або подача й

видалення води з резервуара. Для цього необхідно виконати роботу зі створення потоку води.

Загальна функціональна схема насосної системи наведена на рис. 2.



Рис. 2 Функціональна схема НС

Затрачувана потужність на виконання корисної роботи може бути визначена за формулою:

$$P_{гидродин} = QH, \quad (1)$$

де H [Па] – повний тиск (напор), що розвивається насосною установкою, являє собою різницю повних тисків потоку на виході з насосної установки й на вході в неї;

Q [м³/с] – продуктивність (об'ємна витрата), що являє собою об'ємну кількість газу, який надходить у насосну установку за одиницю часу.

Необхідний потік води на виході насосної установки створюється шляхом перетворення механічної енергії в гідродинамічну за допомогою насоса.

Необхідна механічна потужність, яка забезпечує обертання вала насоса, може бути визначена за формулою:

$$P_{мех} = M \cdot \omega, \quad (2)$$

де M [Нм] –момент на валу насоса;

ω [с⁻¹] – частота обертання вала насоса.

Необхідний момент на валу насоса забезпечується шляхом перетворення, як правило, електричної енергії в механічну за допомогою електродвигуна.

Споживана з мережі електрична потужність може бути визначена за формулою:

$$P_{el} = \sqrt{3}UI \cos \varphi, \quad (3)$$

де U [В] – напруга живлячої мережі;

I [А] – споживаний з мережі струм;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

При перетворенні енергії неминуче виникають втрати. Величина, яка показує частину сумарної надхлджуваної енергії, яка корисно витрачається в розглянутому пристрої (тобто енергетичну ефективність роботи пристрою), називається ККД і визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_{кор}}{P_{\Sigma}}, \quad (4)$$

де $P_{кор}$ – потужність, витрачення для виконання корисної роботи;

P_{Σ} – сумарна спожита потужність.

У середньому, питома витрата електроенергії в комунальних водопроводах (без урахування станцій підкачування в будинках) складає 0,65 квт·год на 1 м³ поданої води, причому приблизно 80 % електроенергії витрачається насосними станціями.

З підвищенням поверховості будинків, віддаленням джерел водопостачання від житлових масивів питома витрата електроенергії збільшується.

Виявлення і використання ресурсів зниження максимальної потужності та загальної витрати електроенергії набувають усе більшого значення ще й тому, що системи комунального водопостачання розвиваються високими темпами (щорічний приріст продуктивності складає 4-5 %).

Найбільшого ефекту можна домогтися за рахунок скорочення витрат електроенергії, споживаної приводом насосних агрегатів. При цьому основна задача полягає не лише в підвищенні їх ККД, але й у скороченні всіх видів втрат і нераціональних витрат води, вирівнюванні режимів її подачі, зниженні необхідних напорів на виході з насосних станцій і зменшенні надлишкових напорів.

Режим роботи насосної установки істотно залежить від зміни режимів роботи водоспоживання. Як правило режим водоспоживання визначається багатьма незалежними одна від одної причинами: кліматичними погодними умовами, режимом роботи підприємств і організацій міста, числом культурно-видовищних заходів, змістом їх програм. Режим водоспоживання звичайно характеризується добовими, тижневими і т.п. графіками водоспоживання (рис. 3).

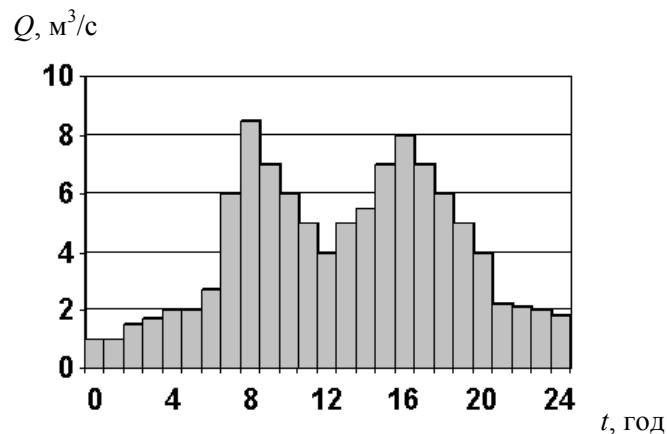


Рис. 3 Добовий графік водоспоживання

Подача насосних установок, які працюють безпосередньо на мережу без проміжних емностей у кожний момент часу, дорівнює водоспоживанню (час відсутності витоків і непродуктивних витрат). У дійсності в будь-якій системі водоподачі є місце витоків і непродуктивні витрати, значення яких сягають у багатьох випадках становлять 15-20% загальної подачі. Отже, подача насосної установки повинна бути більшою водоспоживання саме на це значення.

При стабільному водоспоживанні установки працюють з постійною подачею і тиском чи напором, що між собою зв'язані співвідношенням $H = p / \rho g$, де H – напір, м; p – тиск насоса, Па; ρ – густина рідкого середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}^2/\text{с}$. З ростом водоспоживання подачу треба збільшувати. При цьому втрати тиску в трубах зростають. Щоб компенсувати ці втрати, треба ще збільшувати тиск, який розвиває насосна установка. При зменшенні водоспоживання подача і тиск повинні бути зменшені. Приведення у відповідність

водоспоживання і подачі здійснюється на даний час найчастіше зміною числа працюючих насосних агрегатів чи ступеня відкриття засувки на напірних лініях насосів і насосних установок.

Незважаючи на різноманіття схем водопостачання міст і промислових об'єктів їх можна звести до кількох типових рішень. У будь-якому випадку конкретна схема водопостачання буде аналогічна описаній нижче чи комбінацією з них.

На рис. 4 зображена схема № 1 - водозабір з водонапірною баштою. Схема зовсім тривіальна і функціонує за одним алгоритмом: у залежності від рівня води у башті необхідно вмикати і вимикати насоси артезіанських свердловин.

Тиск у міській мережі в повній відповідальності з законами фізики дорівнює рівню в резервуарі плюс висота башти, якщо його виражати в метрах водяного стовпа (10м води приблизно 1 атмосфера). Від персоналу залежить порядок вмикання і вимикання насосів. Регулювання вмиканням з урахуванням часу доби доцільно при двотарифній системі оплати електроенергії, якщо об'єм башти покриває потреби денного водозабору.

Теоретично у башти повинний бути встановлений датчик мінімального рівня для збереження пожежного запасу води. Зі сигналом цього датчика забороняється водозабір - подача води з башти, але цієї норми не завжди дотримуються.

Як варіант може існувати водозабір з відкритого водойму, що зовсім не змінює алгоритмів й ідеології, а тільки тип застосованих для водопідйому насосів.

Виродженням даної схеми є варіант, який можна знайти в будь-якому дачному будинку – один насос (артезіанський чи самовсмоктувальний) і напірний бак-накопичувач (гідрофор). Алгоритм керування цілком аналогічний раніше описаному, тільки замість рівнів у башті для керування насосом використовуються значення тиску, одержані від реле тиску. Для промислових систем з гідрофорами великого об'єму необхідний контроль рівня води в ньому. Для цього в бак встановлюється поплавковий датчик рівня на два положення, що контролює роботу компресора, який

закачує в гідрофор повітря для забезпечення надлишкового тиску. Вода з гідрофора витісняється повітрям, при зниженні тиску до встановленого рівня включається насос. При досягненні встановленого тиску насос виключається. Якщо повітря в баку мало, то високий рівень води вмикає повітряний компресор. Повітря витісняє воду в мережу до встановленого рівня, і компресор вимикається.

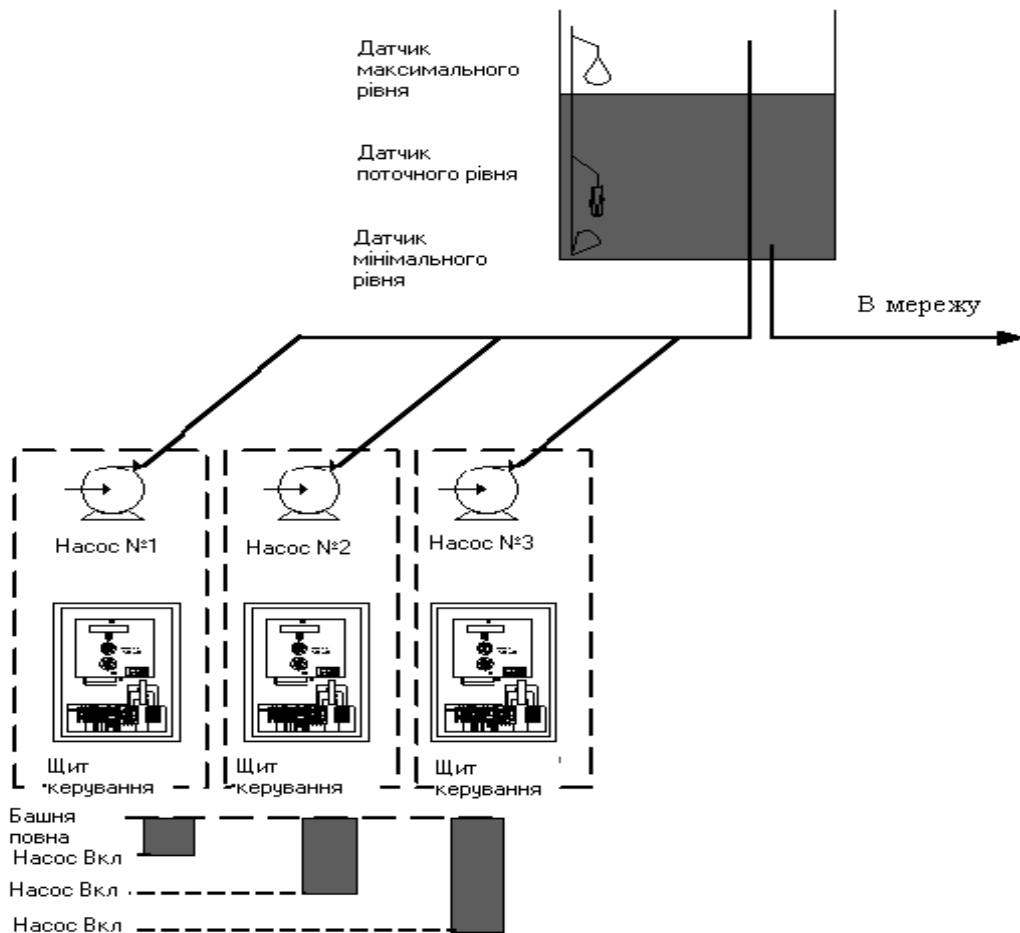


Рис. 4 Водозабір з водонапірною башнею

На рис. 5 зображена схема №2 - водозабір зі станціями другого підйому.

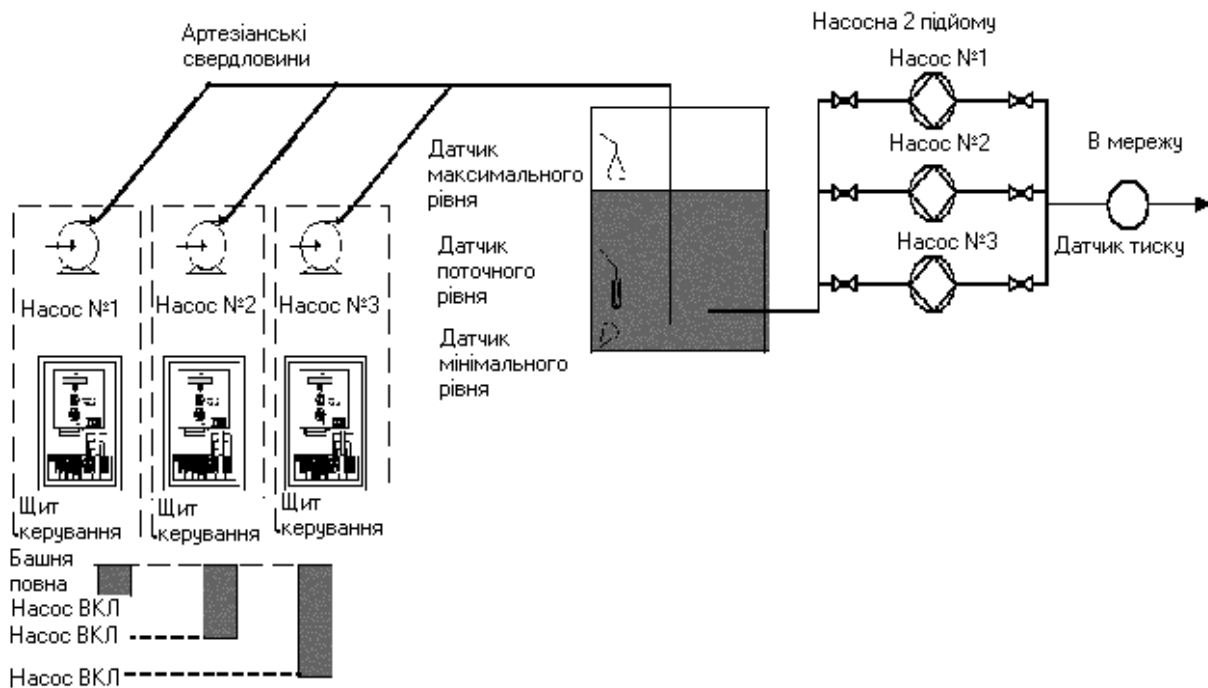


Рис. 5 Водозабір зі станціями другого підйому

Якщо резервуар закопаний у землю, то виникне необхідність створення тиску в міській розподільній мережі. Для цього будуються насосні другого підйому. Насоси підтримують тиск у міській мережі згідно показань датчика тиску працівником насосної станції, що вмикає чи вимикає насоси другого підйому чи прикриває вихідну заслінку. В економічно розвинених країнах встановлюють на других підйомах станції з регульованим приводом.

Усе що було викладено про башту, справедливе і для накопичувальних резервуарів, включаючи датчик пожежного рівня. Традиційно резервуари мають більший ніж башта об'єм і тому більш перспективні для впровадження двухтарифної системи оплати електроенергії. Вночі, коли електроенергія дешевше, працюють менш економічні насоси артезіанських свердловин, а вдень, якщо ємності резервуарів вистачає на день, працюють тільки більш економічні насоси другого підйому.

Для висотних будинків будуються насосні станції третього підйому. Це дозволяє знизити загальний тиск у міських магістралях з масою позитивних наслідків – від зниження втрат до економії електроенергії.

У великих містах можна помітити різні комбінації вищенаведених схем – після насосних другого підйому башти і далі насосні третього підйому, відкритий водозабір у поєднанні з артезіанськими свердловинами.

Насосні агрегати можна умовно поділити на три великі групи:

- потужні (понад 500 кВт) агрегати енергетичних об'єктів;
- промислові агрегати і насосні станції централізованого водопостачання (50-300 кВт);
- масові установки (2-50 кВт), до яких належать насоси з подачею 12-100 м³/год і напором 20-80 мм вод.ст.

У першій групі в силу її специфіки застосовуються прогресивні види електропривода. В другій і особливо в третій, найбільш масовій, дотепер переважає нерегульований електропривод з асинхронними короткозамкненими двигунами, а керування продуктивністю здійснюється вкрай неефективним способом - дроселюванням. Це не дозволяє забезпечити режим раціонального енергоспоживання і витрати води, пари, повітря і т.ін. при зміні технологічних потреб у широких межах.

1.3 Регулювання насосних установок

Характерним прикладом таких механізмів є насосні станції холодного і гарячого водопостачання і систем опалення житлових будинків і промислових споруд. Вибрані, виходячи з максимальної продуктивності, ці механізми значну частину часу працюють з меншою продуктивністю, що визначається зміною потреби в різні періоди часу. За деякими даними середньодобове завантаження насосів холодного водопостачання складає всього 50-55% максимального. Існуючі системи водопостачання не забезпечують помітного зниження споживаної потужності при зменшенні витрати, а також обумовлюють істотний ріст тиску (напору) у системі, що

призводить до витоків води і несприятливо позначається на роботі технологічного устаткування і мереж водопостачання.

Насос має квадратичну залежність моменту опору від швидкості, а потужність на валу двигуна турбомеханізму зменшується в кубічній залежності при зниженні частоти обертання. Відповідно великі і можливості енергозбереження.

Традиційні способи регулювання подачі насосних установок полягають в дроселюванні напірних ліній насосів і зміні загального числа працюючих агрегатів по одному з технологічних параметрів - тиску на колекторі в точці мережі, рівню в прийомному чи регулюючому резервуарі й т. ін. Ці способи регулювання спрямовані на вирішення технологічних задач і практично не враховують енергетичних аспектів транспорту води. При такому регулюванні від 5 до 15%, а в окремих випадках до 25-30% споживаної електроенергії витрачається нераціонально через:

- втрати енергії в дроселюючому органі;
- створення надлишкових напорів у трубопроводній мережі;
- витоків і непродуктивних витрат води в мережі й у споживача;
- збільшення геометричного підйому при відкачці води з резервуарів каналізаційних насосних станцій і т.д.

Тому з появою надійного регульованого електропривода створилися передумови для розробки принципово нової технології транспорту води з плавним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії із широкими можливостями підвищення точності й ефективності технологічних критеріїв роботи систем водоподачі. При цьому геометричним місцем робочих точок насосної установки стають характеристики трубопроводів, а не характеристики насосів як у випадку регулювання подачі насосних агрегатів з постійною частотою обертання.

Однак саме по собі оснащення насосної установки регульованим електроприводом не гарантує економії електроенергії. Щоб одержати економію електроенергії необхідно наступне. По-перше, переконатися в потенційній можливості її економії на об'єкті з урахуванням його

технологічних, гідравлічних і режимних характеристик, а по-друге, розробити раціональні технічні рішення з урахуванням додаткових капітальних витрат на їх впровадження і здійснити такий алгоритм керування насосною установкою, при якому практично реалізується потенційна можливість економії електроенергії.

Для розв'язання обох задач обов'язковий системний підхід, коли насосна установка як об'єкт аналізу і керування розглядається з погляду кількісної визначеності всіх параметрів стану взаємопов'язаних характеристик працюючих регульованих і нерегульованих насосів, характеристики трубопровідної мережі, режим енергоспоживання насосної установки, частоти обертання електроприводів, діапазону і характеру розподілу подач насосної установки і т.д.

Рис. 6 ілюструє можливості зниження потужності, споживаної двигуном насоса, при регулюванні швидкості електропривода в порівнянні з регулюванням дросельною заслінкою.

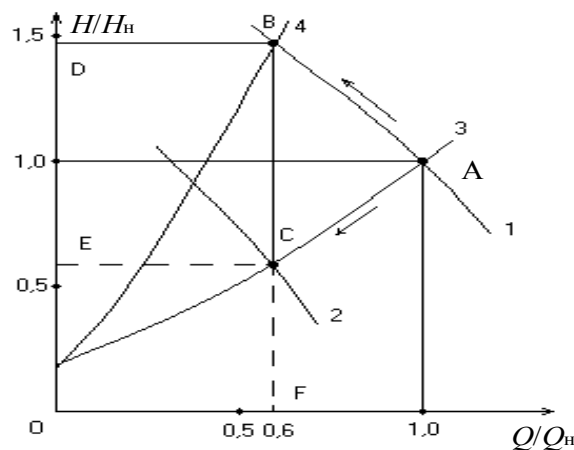


Рис. 6 Характеристики насоса при регулюванні швидкості електропривода в порівнянні з регулюванням дросельною заслінкою

При номінальній витраті і напорі насос працює в точці А, що відповідає характеристиці магістралі 3 і характеристиці $Q - H$ насоса (крива 1) при номінальній швидкості двигуна. Зі зменшенням витрати при нерегульованому електроприводі (на рис. показана витрата, що складає $0,6Q_n$) за рахунок дросельного регулювання відбувається зміна опору

магістралі (крива 4). Насос працює в точці В кривої 1, що призводить до зростання напору, який стає більшим від номінального. Потужність, споживана насосом, пропорційна площі прямокутника ODBF.

При використанні регульованого електропривода за рахунок зниження швидкості насос працює при зниженні витрати в точці С, що відповідає іншій характеристиці $Q - H$ (крива 2) при незмінній характеристиці магістралі (крива 3). Потужність, споживана електроприводом у цьому випадку, пропорційна ОЕСФ, що наочно ілюструє можливість істотного зниження енергоспоживання при впровадженні регульованих електроприводів насосів. Найкращі техніко-економічні показники при регулюванні швидкості насосів забезпечує система ПЧ-АД.

Щоб повніше уявити енергетичні процеси в насосній установці, обладнаній регульованим електроприводом, варто враховувати, що переміщення робочих координат насоса по характеристиці водоводу при зниженні подачі насосної установки призводить, як правило, до виходу робочих точок насоса з робочої зони, тобто до зниження ККД працюючих агрегатів, а в ряді випадків до кавітаційного чи помпажного режиму. Особливо значних змін зазнає ККД регульованих насосів - у них він може змінюватися від номінальних значень до нуля, коли при зниженні частоти обертання тиск, що розвивається насосом, дорівнює або нижче тиску, створюваного роботою паралельно ввімкнених насосів, чи геометричного підйому.

На рис. 7 показана у відносних одиницях $\eta^* = \frac{\eta_i}{\eta_n}$ і $\frac{H_{CT}}{H_\phi}$ область значень ККД регульованого насоса η_i , обмежена величинами $\eta_i = 0,95 \cdot \eta_n$ і $\eta_i = 0,1 \cdot \eta_n$. Тут η_i , η_n - поточна і номінальна частота обертання насоса; H_{CT} і H_ϕ - геометричний підйом чи протитиск і фіктивний напір насоса при нульовій подачі.

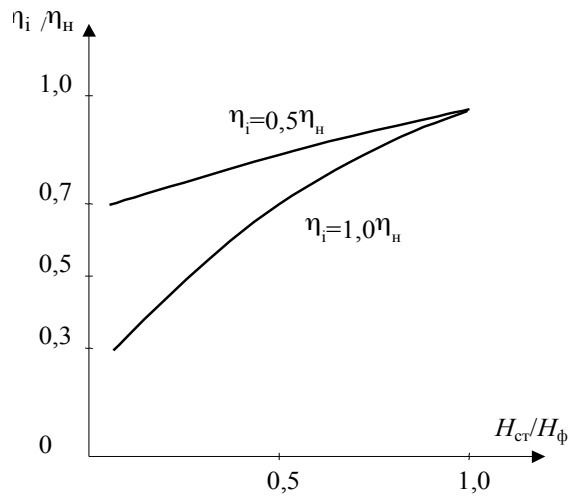


Рис. 7 Залежність ККД насоса від напору у відносних величинах

З рисунка 7 видно, що значення ККД залежать як від частоти обертання, так і від поточних координат насоса, водоводу і протитиску в мережі. Тому закономірна поява питання, якою мірою зниження ККД насоса при зменшенні обертів компенсується зниженням напорів при русі по траєкторії водоводу. Визначено, що для регульованого насоса в залежності від його характеристик, а також характеристик паралельно працюючих насосів і трубопровідної мережі існує обмежений інтервал частоти обертання, на якому його енергетичні характеристики не гірші ніж при номінальній частоті обертання.

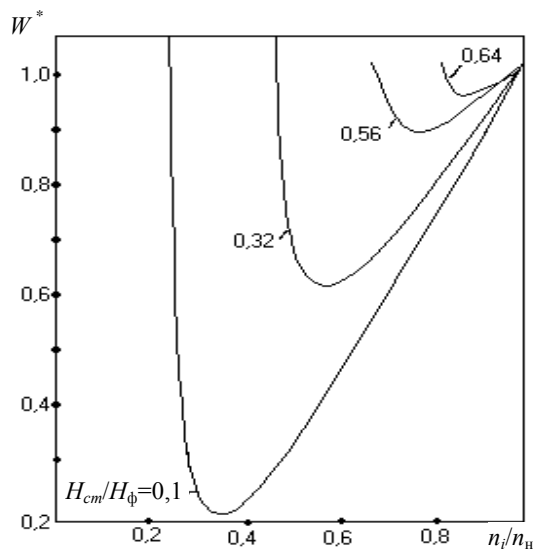


Рис. 8 Залежність питомих витрат електроенергії від частоти обертання у відносних величинах

На рис. 8 зображені криві, що відбивають залежності відносних питомих витрат електроенергії W^* на перекачування одиниці об'єму води від відносної частоти обертання $(\frac{n_i}{n_n})$ насоса при різних значеннях протитиску в мережі.

Залежності мають яскраво виражений екстремальний характер. Спочатку при зниженні частоти обертання від номінальних обертів питомі витрати електроенергії знижуються, а потім, коли економія електроенергії від зниження напору стає сумірною з втратами від зниження ККД насоса, виявляється екстремум функції. В подальшому зменшення частоти обертання призводить до різкого зростання питомих витрат електроенергії, і ліва ділянка кривих іде в нескінченність при прямуванні ККД насоса до нульового значення. Абсолютне значення екстремуму кривих залежить від протитиску з боку працюючих насосів. При зміні числа насосів екстремум зміщується в ту чи іншу сторону.

Оскільки системи водоподачі являють собою динамічні об'єкти, у яких постійно змінюються в часі робочі параметри, насосна установка може потрапити в режим роботи, при якому значення ККД виявляться занадто низькими (до 0,1). При деяких умовах цей режим може бути тривалим (до 3 - 5 год. на добу). Щоб уникнути таких режимів, уже на стадії розробки САУ розраховують режимні точки, при яких варто робити зміну загального числа працюючих агрегатів, щоб мінімізувати енергоспоживання насосної установки. При реалізації систем автоматичного керування застосовуються технічні рішення, що дозволяють утримувати регульовані агрегати від входження в зону низьких значень ККД насоса. Ці рішення використовують сучасну програмувальну мікропроцесорну регулюючу апаратуру, здатну ідентифікувати об'єкт керування і розраховувати поточні значення настроювальних параметрів САУ. Потім за допомогою регульованого електропривода переміщувати вектор параметрів стану об'єкта відповідно до критерію регулювання, що розраховується тим самим регулюючим пристроєм або задається по зовнішній програмі.

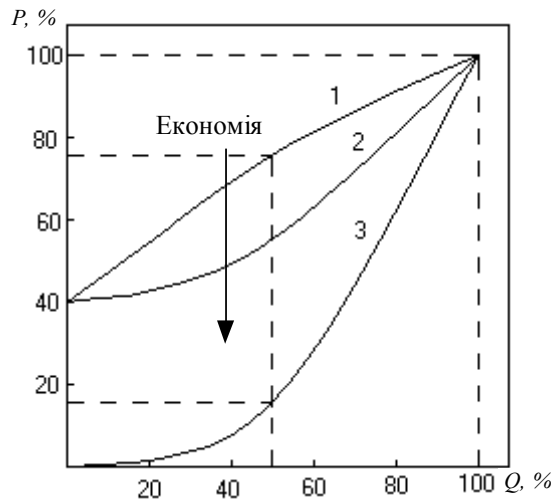


Рис. 9 Витрати електроенергії в залежності від виду регулювання

На рис. 9 порівнюються криві необхідної потужності насосних приводів трьох принципів керування. Як видно з рисунка при подачі в обсязі 50% розрахункового максимуму необхідна потужність при дроселюванні (крива 1) складає 73%, при використанні запірно-регулюючої арматури (крива 2) - тільки 50% номінальної, при регулюванні частоти обертання електродвигуна (крива 3) - всього 14% номінальної потужності.

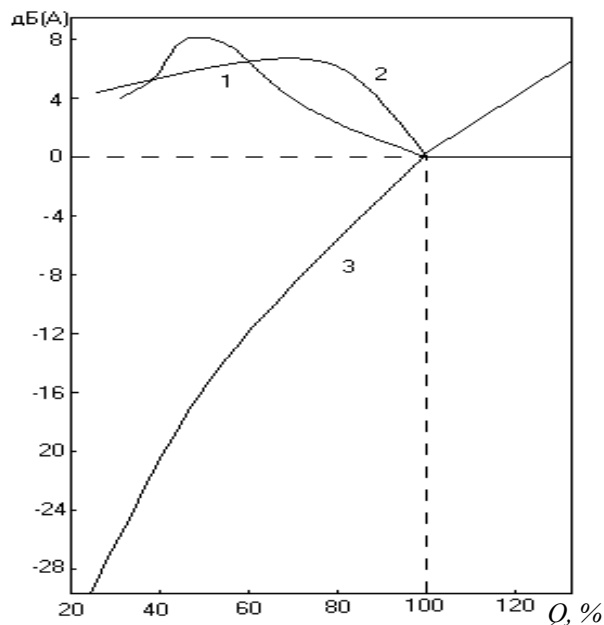


Рис. 10 Зміна рівня звукового тиску (шумів) при регулюванні потоку з трьома різними системами

Економічність визначається не тільки енергетичними витратами, враховуються також шуми при регулюванні. Рис. 10 показує зміну рівня звукового тиску (шумів) при регулюванні потоку з трьома різними системами. Тут: 1 - регулювання дроселем; 2 - використання запірно-регулюючої арматури; 3 - регулювання частоти обертання електродвигуна.

Виходячи з номінальної точки, показане зростання рівня звуку для обох механічних систем, особливо в діапазоні частот потрібного робочого режиму - від 40 до 80% проектного максимуму. У цьому випадку при електричному регулюванні частоти обертання електродвигуна рівень звуку падає на 20 дБ. У порівнянні з механічною системою виграш складає 20-30 дБ, завдяки чому витрати на шумознижуючі заходи значно зменшуються.

Для кількісної оцінки економії електроенергії і води при впровадженні регульованого електропривода на одній з підкачувальних насосних станцій холодного водопостачання, житлових будинків був установлений частотно-регульований електропривод, що забезпечує сталість напору на виході насоса незалежно від витрати, і виконані запис тиску на вході і виході насосної станції і виміри витрати електроенергії і води при роботі в нерегульованому і регульованому режимах. Насос з номінальною подачею $100 \text{ м}^3/\text{год}$ і напором 32 м приводився в обертання асинхронним двигуном потужністю 15 кВт.

Проведені вимірювання показали, що за рік економія електроенергії склало близько 45500 кВт год (40,5%), а економія води – 114135 м^3 (25%). При економічному ефекті тільки за рахунок економії електроенергії вартість електричного устаткування для регулювання частоти обертання електродвигуна окупиться за рік експлуатації.

Наведений приклад переконливо підтверджує можливість істотного зниження енергоспоживання при використанні систем регульованих асинхронних електроприводів (особливо ПЧ-АД). Попередні розрахунки показують, що при широкому впровадженні частотно-регульованих приводів можна заощадити 7-10% виробленої електроенергії.

Поява регульованого електропривода в насосних установках систем водопостачання і водовідведення дозволить створити принципово нову

енергозберігаючу технологію транспорту води, у якій заощаджується не тільки електроенергія, але і зберігається теплова енергія, скорочується витрата води за рахунок витоків її при перевищеннях тиску в магістралі, коли витрата мала. При частотному регулюванні насосів можна в значній мірі уникнути аварійних ситуацій за рахунок запобігання гідравлічним ударами, що виникають при зміні режимів роботи і пуску системи при нерегульованому електроприводі.

Отримано можливість гнучкого й оперативного розв'язання задач водоподачі і водовідведення при істотному зниженні витрати електроенергії при перекачуванні води і стоків. Однак, щоб реалізувати таку можливість, необхідно на всіх стадіях розробки, впровадження й експлуатації систем керування режимом водоподачі мати у своєму розпорядженні максимально повну кількісну інформацію про стан об'єкта автоматизації.

Приклад енергетичної діаграми для насосної системи наведений на рис. 11.

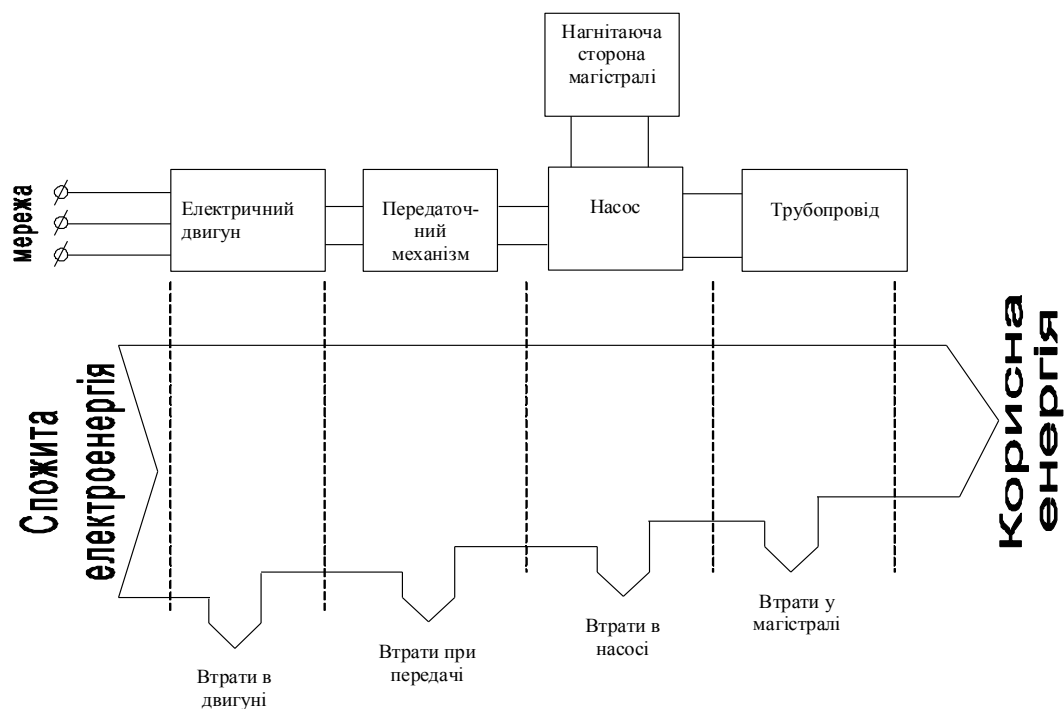


Рис. 11 Енергетична діаграма насосної системи

З енергетичної діаграми видно, що рівняння енергетичного балансу для розглянутої системи буде мати вигляд:

$$P_{СП} = \Delta P_{д} + \Delta P_{пер} + \Delta P_{н} + \Delta P_{маг} + P_{кор}, \quad (5)$$

де $P_{СП}$ [Вт] – потужність, спожита з мережі;

$P_{кор}$ [Вт] – потужність, що затрачується на виконання корисної роботи; $\Delta P_{д}$ [Вт] – втрати потужності у двигуні при перетворенні електричної енергії в механічну; $\Delta P_{пер}$ [Вт] – втрати потужності в передавальному механізмі при передачі механічної енергії від двигуна насосу; $\Delta P_{н}$ [Вт] – втрати потужності в насосі при перетворенні механічної енергії в гідродинамічну; $\Delta P_{маг}$ [Вт] – втрати потужності в магістралі при передачі гідродинамічної енергії.

Як уже згадувалося, визначення величини складових енергобалансу може здійснюватися різними способами. Розглянемо окремо аналітичні вирази, які зв'язують енергетичні характеристики застосовуваного в насосних системах устаткування. А також вимірювальне устаткування й методи вимірювань, використання яких дозволить визначити величини складових енергобалансу.

2. ОСНОВНІ МОЖЛИВОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

На цьому етапі необхідно сформулювати основні заходи, впровадження яких дозволить більш ефективно використовувати енергію розглянутою насосною системою, що призведе до зменшення споживання енергоресурсів.

Якщо в результаті аналізу ефективності використання енергії були виявлені ділянки, на яких втрати енергії більші закладених у проекті або в порівнянні з результатами останнього обстеження, то формулюються заходи, що дозволяють знизити виявлені втрати.

Також необхідно розглянути рівень фактичного завантаження устаткування під час проведення аудиту і розглянути ефективність заміни

наявного устаткування сучасними, більш ефективними аналогами або застосуванням більш ефективніших засобів регулювання продуктивності.

Значного скорочення витрати електроенергії при експлуатації НУ можна досягти шляхом впровадження ряду МЕЗ. Перелічимо деякі з них:

- заміна малопродуктивних насосів високопродуктивними з більшим ККД (економія 3-10%);

- забезпечення максимального завантаження насосів у залежності від насосної установки (економія 5-10%);

- заміна насосів відповідно до характеристик трубопроводів. Уточнення паспортних характеристик трубопроводів, режимів роботи після кап.ремонтів, заміни насосів і т.д. (економія 5-15%);

- підвищення ККД насоса шляхом устанавлення додаткових ущільнень, обслуговування підшипників, балансування робочих коліс і т.д. (економія до 20%);

- устанавлення робочого колеса безпосередньо на валу двигуна. Якщо потужність ел.двигуна більша потужності, споживаної насосом (на 20-25%), то насос працює з найбільшим ККД;

- збільшення діаметра трубопроводу. При збільшенні діаметра труби на 50% втрати зменшуються на 75%;

- автоматизація керування продуктивністю насоса знижує споживання електроенергії на 5-20%;

- установка оптимального передаточного числа ремінної, зубчастої, або ін. передачі (у редукторі). Передаточне число (оптим.) повинне підтримуватися постійним. Подвоєння діаметра трубопроводу збільшує в 8 разів продуктивність, в 4 рази збільшує тиск, і збільшує споживану потужність (напір=const). Подвоєння швидкості потоку в 2 рази збільшить тиск в 4 рази, і збільшить споживану потужність у 8 разів;

- зменшення кавітації;

- розміщення насоса якнайближче до рівня перекачуваної рідини, що призведе до економії електроенергії до 10%;

- у простих замкнутих системах необхідно розміщати діафрагмовий розширювач як 1-й елемент системи, а потім розташовувати насос на прямій лінії тепло розподільчої системи.

- забірні патрубки необхідно робити якнайменше (скоротивши довжину патрубка на 10%, економія - 20%);

- необхідно збільшувати діаметр забірних патрубків (при збільшенні діаметра на 20%, економія електроенергії буде 30%);

- установка накопичувачів води на висоті необхідного напору із пристроями відключення насоса при заповненні накопичувача (економія 3-8%);

- систематичне обслуговування насосних систем знизить споживання електричної енергії на 1% та збільшить ККД на 1-2%;

- зниження питомої витрати електроенергії через зменшення напору в результаті усунення в трубопроводі зайвих арматур і непотрібних поворотів дає економію до 15%.

- запровадження зворотного електропостачання може скоротити витрати первинної води в 2 рази і забезпечити економію електроенергії на 15-20%.

Підвищення ККД насосів забезпечується за рахунок ретельного балансування робочих коліс, регулярною зміною ущільнювачів, забезпеченням робочої точки насоса в зоні максимальних значень ККД.

Підвищення ККД трубопроводу може бути за рахунок:

- збільшення перетину труб по всій довжині і на окремих ділянках;
- включення в паралельну роботу резервного нагнітального ставу;
- скорочення довжини трубопроводу, заміна похилих ділянок вертикальними;

- регулярне очищення трубопроводу;
- ліквідація в трубопроводі зайвої арматури і непотрібних поворотів чи зниження їх опору згладжуванням гострих кутів;

- використання арматури з меншими значеннями коефіцієнта місцевого опору (наприклад, заміна в приймальних пристроях на всмоктувальних трубопроводах тарілчастих клапанів на кульові).

3. ВТРАТИ В НАСОСНИХ СИСТЕМАХ

3.1 Витрати на перекачування витоків та невиробничих витрат води

Частина води, яка подається споживачу, марно витікає крізь нещільності в трубопровідних арматурах, у санітарно-технічних приладах та інших пристроях. Крім того, за рахунок підвищення напору в мережі через водорозбірну арматуру споживачеві подається води більше, ніж потрібно.

Витоки й непродуктивні витрати досягають 20-25% загальної витрати води. На їх перекачування витрачається додатково 20-25% електроенергії, що витрачається на подачу води. Крім того, витоки й непродуктивні витрати води попадають у каналізацію, що також вимагає додаткових витрат електроенергії на їх перекачування й обробку в системі водовідведення й очищення стічних вод.

Результатами експериментальних досліджень встановлено, що найбільша частка витоків води припадає на змивні бачки й становить до 40% всіх видів витоків і нераціональних витрат. Підвищення напору збільшує витоки через нещільності в поплавковому клапані, одночасно істотно підвищується рівень води в змивному бачку аж до переливного отвору, крізь яке вода надходить у каналізацію, що додатково збільшує витрату електроенергії на перекачування й обробку стічних вод.

Наступне місце за витоками води займають непродуктивні витрати, які становлять до 23% загальних витрат води. Ці витрати також залежать від перевищення напору в мережі, а крім того - і від коливань температури гарячої води в системі гарячого водопостачання.

Так, занадто великий напір у системі водопостачання збільшує непродуктивні витрати. Вибіркове обстеження ряду абонентських введів у м. Києві показало, що напір на вводі споживачів перевищує необхідний на 30-45%. Низька температура гарячої води змушує споживача зливати велику кількість води в каналізацію доти, поки із системи не піде вода

вищої температури. Мінімальні витрати гарячої води мають місце при температурі 55...60 °С.

Велика кількість розосереджених споживачів у системі водопостачання унеможливує усунення витоків повністю. У всякому випадку усунення витоків у споживачів мало залежить від експлуатаційного персоналу насосних станцій. Однак існує можливість зменшити їх за рахунок оптимізації режиму роботи насосних установок.

Оцінити втрати електроенергії в насосних установках, що викликані витокami та невиробничими витратами води, можна наступним чином. Відомо, що кількість води, що витікає з отвору, пропорційна корню квадратному із значень напорів

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \quad (6)$$

де Q_1 – витрата при нормальному напорі H_1 , Q_2 – витрата при напорі H_2 . Звідси, наявність надлишкового напору в мережі збільшує витоки та невиробничі витрати на значення:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = Q_1 \left(\sqrt{\frac{H_2}{H_1}} - 1 \right). \quad (7)$$

Розрахунки, виконані за цією формулою, а також експериментальні дослідження показують, що збільшення напору збільшує витоки на 13-20%, а загальну витрату води – на 2-5%.

3.2 Гідравлічний опір системи

Насосні установки працюють із підвищеним напором через збільшення гідравлічного опору системи трубопроводів, коливань рівня рідини в приймальних та напірних резервуарах, а також режиму притоку або споживання рідини.

Підвищення напору в результаті зміни гідравлічного опору не є постійним, а залежить від витрати рідини, тобто впливає на значення динамічної складової напору v^2/g , що його розвиває насосна установка, змінює крутість характеристики трубопроводу.

Однією з поширених причин збільшення гідравлічного опору труб є їх внутрішня корозія, у результаті якої знижується пропускна здатність трубопроводів, і виникає необхідність у підвищенні напору, аби при підвищеному гідравлічному опорі забезпечити подачу тієї само кількості рідини.

Поряд з корозією джерелом додаткового гідравлічного опору є низька якість труб і поганий монтаж трубопроводів. Труби, виготовлені зі значними відхиленням від установлених розмірів і геометричної форми, при з'єднанні один з одним утворюють уступи, які збільшують гідравлічний опір трубопроводів. Аналогічний негативний ефект створюють зварювальні шви, виконані з низькою якістю.

Джерелом виникнення додаткового гідравлічного опору є також низький рівень експлуатації насосних установок і системи трубопроводів. Через неухважність експлуатаційного персоналу можливе неповне відкриття затворів та засувок.

Мають місце випадки, коли після завершення ремонтних робіт залишаються закритими деякі засувки та затвори. У результаті окремі ділянки трубопроводів залишаються виведеними з роботи, що також є причиною підвищення напору в системі транспортування рідини та вимагає додаткових витрат електроенергії.

У ряді випадків збільшення гідравлічного опору обумовлено невдалою конструкцією трубопровідних арматур. Так, наприклад, запірний орган зворотних затворів існуючої конструкції утримується у відкритому стані підйомною силою потоку рідини. При роботі насоса зі зниженою подачею зменшується швидкість потоку рідини, внаслідок чого зменшується його підйомна сила. У результаті поворотний диск зворотнього затвору повертається на невеликий кут і частково залишається в потоці, що веде до збільшення гідравлічного опору й додаткових витрат електроенергії.

Виявити такі джерела підвищення гідравлічного опору можна при планових та вибіркових випробуваннях водопроводів, магістралей і окремих трубопроводів мережі. У ході таких випробувань повинні бути побудовані характеристики трубопроводів і здійснено їх порівняння з

результатами розрахунків та попередніх випробувань. Збільшення крутості фактичної характеристики трубопроводу в порівнянні з розрахунковою або побудованою за результатами попередніх випробувань вказує на те, що в трубопроводі є додаткові опори, та необхідно вжити заходів щодо їх виявлення й усунення.

ККД трубопроводу залежить від втрат напору в його елементах й оцінюється виразом:

$$\eta_M = \frac{H_{ст}}{H} \quad (8)$$

де $H_{ст}$ - манометричний напір насоса.

У зв'язку з підвищенням опору трубопроводу, зношуванням запірних арматур, частковою розгерметизацією ККД трубопроводу в процесі експлуатації змінюється.

З урахуванням обмеження за умовою усталеної роботи насоса на трубопроводі $\frac{H_{г}}{H_{о}} \leq 0,95$

ККД трубопроводу не може бути більшим 0,95.

Являє інтерес визначення максимального загального ККД водовідливної установки. Якщо ккд електромережі прийняти 0.98, ККД двигуна – 0.94, насоса – 0.7і трубопроводу – 0.95, то загальний ККД установки:

$$\eta_{Max} = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,7 \cdot 0,95 = 0,62$$

З огляду на те, що середньостатистичні дані ККД водовідливу по галузі становлять 0.52 можна стверджувати, що існує потенціальна можливість економії енерговитрат на 10% при одночасному підвищенні надійності функціонування водовідливу.

3.3 Методи зменшення втрат в системі

У процесі експлуатації насосів через зношування збільшуються зазори між кільцем для ущільнення і робочим колесом насоса, у результаті чого збільшується переток рідини з напірної частини насоса в усмоктувальну, знижується ККД насоса і, як наслідок, збільшується споживання електроенергії на перекачування рідини. Тому стає важливою завдання своєчасного виявлення збільшених зазорів між робочим колесом та кільцем для ущільнення. Перевірка зазорів здійснюється зазвичай в ході поточних, середніх і капітальних ремонтів. Розмір зазору залежить від діаметра робочого колеса насоса, його типу й наводиться в супровідній технічній документації насосного агрегату. Зазори вимірюють у точках, розташованих у діаметрально протилежних напрямках, при чотирьох положеннях робочого колеса, що повертає в одному напрямі на кут 90° . Несиметричність обмірювальних зазорів не повинна перевищувати 20% середнього значення розміру зазору.

Для забезпечення нормальної й економічної роботи насосів важливе дотримання оптимальних розмірів зазорів у підшипниках. Занадто малі зазори ведуть до збільшення втрат на тертя й, отже, нерационально збільшують витрату електроенергії, а більші викликають биття й передчасне спрацювання устаткування.

Для економічної роботи насосного агрегату варто забезпечувати передбачене для даної конструкції змащення. Наприклад, підшипники кочення й бабітові підшипники змащуються моторними мастилами відповідної в'язкості й інших фізико-хімічних властивостей. Гумові й лігнофенові підшипники змащуються чистою водою (мутність не більше 50мг/л). Витрата води на змащення одного підшипника залежить від діаметра робочого колеса насоса (таблиця 1).

Таблиця 1

Діаметр робочого колеса	мм	до 1100	до 1850	до 2600
Витрата води	л/с	0.5	1	2

Щоб уникнути більших втрат на тертя в сальниках насосів затягування натискної букси не повинна бути зайво великим. Набивка сальника збирається з окремих кілець із косим зрізом і розміром зазору в стиках 3 – 5 мм. При установці кілець стики заміщують оди відносно одного на кут 100-120°. Кільця водяного затвора встановлюють напори отвору, через яке подають у сальник воду, тобто кільце ділить чепцеве набивання навпіл. Натискна букса входить у чепцеву коробку приблизно на 1/3 довжини так, щоб вода яка охолоджує й змащує сальник, витікає окремими краплями.

Для зменшення втрат на тертя варто також забезпечувати правильне центрування лінії валів насоса й двигуна.

Якщо контроль зазорів можливий тільки в ході ремонтів і профілактичних оглядів, про стан насосних агрегатів у щоденній експлуатації роблять висновки за показниками контрольно-вимірювальних приладів: манометрів, витратомірів, амперметрів, ватметрів, лічильників електроенергії. Збільшення показань амперметрів, ватметрів, лічильників при постійній подачі свідчить про погіршення стану насосного агрегату, підвищеному зношуванні робочого колеса, надмірному затягуванню сальників, незадовільному стані підшипників. Зниження подачі й напору насоса в сполученні зі збільшенням струму навантаження й споживаної потужності вказує на підвищене зношування робочого колеса.

Неекономічні режими роботи насосних агрегатів мають місце при несправності гідромеханічного устаткування насосної установки. Несправні зворотні клапани, засувки, затвори можуть перебувати в проміжному положенні й створювати додатковий гідравлічний опір у комунікаціях насосних установок. У цьому випадку спостерігається збільшення напору, що розвивається насос з одночасним зниженням напору в мережі. Подача насоса при цьому зменшується так само, як струм навантаження й споживана потужність насосного агрегату. Аналогічні явища спостерігаються при обростанні труб, що викликає додаткове споживання електроенергії.

Подряпини й інші дрібні ушкодження робочих коліс насоса викликані стиранням їхньої поверхні абразивними речовинами, наприклад піском у воді, кавітаційні свищі й кавер, при невеликій глибині (до 2мм) зачищають наждаковим каменем. При більшій глибині їх заварюють електрозваренням. Свищі й тріщини розташовані по краях елементів робочого колеса, розсвердлюють або обробляють зубилом, а потім заварюють електрозварюванням.

У великих насосних агрегатах (робоче колесо діаметром біля 1 м і більше) застосовують шліфування поверхонь лопаток робочих коліс і надають краям їх більш вигідний гідродинамічний профіль. Такий захід дозволяє знизити споживання електроенергії насосним агрегатом приблизно на 1 % (підвищить ККД насоса на 1...2 %).

Ефективним засобом економії електроенергії є підтримка в належному стані системи трубопровод і трубопроводна арматури. Корозійні відкладення зменшують живий переріз труб до 20% і збільшують гідравлічний опір труб в 3 рази більше розрахункового. Для труб діаметром 200 мм і вище застосовується гідромеханічний спосіб очищення за допомогою спеціального пристрою. Цей пристрій забезпечує очищення всієї внутрішньої поверхні труб діаметром від 200 до 1400 мм при заростанні живого перетину трубопроводу довжиною 2 – 10км.

Для запобігання обростання труб у світовій і вітчизняній практиці застосовуються цементно-піщані, поліетиленові, епокаксидні й інші покриття. Звичайно при прокладанні нових трубопроводів на внутрішню поверхню труб захисне покриття наноситься в заводських умовах, а діючих трубопроводів після їхнього очищення в польових умовах. Цементні покриття з різними добавками, у тому числі полімерними, товщиною 1-3см перешкоджають корозії матеріалу труб. Незважаючи на деяке зменшення внутрішнього діаметру труб, покриття підвищують пропускну здатність труб, знижують енерговитрати на подачу рідини.

Одержав також поширення метод протягання усередину трубопроводів поліетиленових труб товщиною стінки 1-2мм. Простір між поліетиленовими трубами й внутрішньою поверхнею трубопроводу

тампонується цементним розчином низьких марок. Відновлення таким способом проржавілих металевих й ушкоджених азбестоцементних і залізобетонних труб обходиться на 70-40% дешевше вартості їхньої перекладки.

3.4 Економія енергії за рахунок зняття надлишкового тиску

Пропонована методика дозволяє виконати необхідні розрахунки з використанням найменшого числа вихідних даних, а саме:

- номінальних параметрів насосних агрегатів і двигунів (потужність $N_{\text{пот}}$, ККД насоса η , двигунів і пристроїв застосовуваних для регулювання);
- глибини регулювання λ (відношення мінімальної продуктивності $Q_{\text{м}}$ до максимальної $Q_{\text{б}}$ установки) ;
- відносного протитиску $H_{\text{п}}^*$ (відношення тиску, що відповідає максимальній продуктивності $H_{\text{б}}$ до протитиску $H_{\text{п}}$) як гідравлічної характеристики трубопроводу.

Надлишковий тиск на напірній лінії насоса створюється при його дроселюванні затвором, засувкою чи іншим пристроєм. На створення цього тиску додатково витрачається енергія. Регулювання кутової швидкості насоса, замість дроселювання, відбувається без додаткової витрати енергії на створення надлишкового тиску.

Завдяки зняттю надлишкового тиску потужність (кВт), споживана насосом, зменшується на величину:

$$\Delta N = 10^3 \frac{Q \Delta H}{\eta}, \quad (9)$$

де Q – продуктивність, м³/с, ΔH - надлишковий тиск, Мпа, η - ККД насоса.

Економія електроенергії за рахунок зняття надлишкового тиску обчислюється за формулою

$$W_{\text{ЕК}} = N_{\text{б}} T \left\{ H_{\text{п}}^* \left(\frac{1,25}{H_{\text{п}}^*} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 - \lambda)(1 + \lambda)^2 \right\}, \quad (10)$$

де $N_B = 10^{-3} Q_B H_B / \eta$ – найбільша споживана насосом потужність, кВт.

Позначимо вираз у фігурній дужці через w^* , і вираз запишемо наступним чином

$$W_{EK} = N_B T w^*, \quad (11)$$

де w^* - питомі втрати електроенергії, що викликані перевищенням напору.

Значення w^* можна знайти за допомогою графіку (рис. 12)

Режим роботи групи насосів відрізняється від режиму роботи одного насоса. Звичайно в насосних установках працює паралельно кілька агрегатів. Тому в рівняння, що визначають результуючу економію енергії в насосних установках, вводиться коригувальний коефіцієнт.

Знижувальний коефіцієнт φ , враховує, що надлишковий тиск створюваний групою насосів менше, ніж тиск, створюваний одним насосом з еквівалентною подачею, і внаслідок цього економія енергії в насосній установці менше, ніж підрахована за формулами.

$$W_{EK} = N_B T w^* \varphi, \quad (12)$$

Значення коефіцієнта φ залежить від кількості робочих агрегатів (таблиця 2).

Таблиця 2

Число робочих агрегатів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ	1,0	0,75	0,66	0,56	0,5	0,47	0,44	0,42	0,4	0,38

Важливим параметром насоса є його ККД. Зміну ККД в залежності від частоти обертання насоса знаходять за допомогою формули:

$$\eta = 1 - \frac{1 - \eta_{НОМ}}{n^*}, \quad (13)$$

де $\eta_{НОМ}$ – значення ККД при номінальній частоті обертання насосу;

$n^* = \frac{n}{n_{НОМ}}$ – відносна частота обертання насоса.

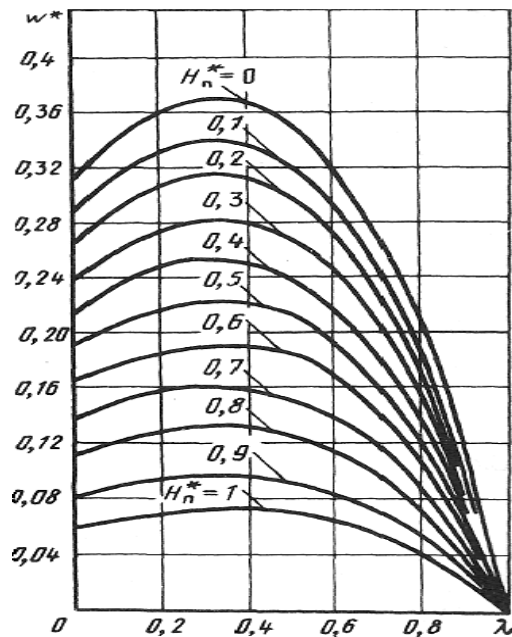


Рис. 12 Питомі втрати електроенергії, що викликані перевищенням напору в залежності від глибини регулювання та відносного протиску

Слід зазначити, що ККД насоса за номінальної частоти обертання не є номінальним. За номінальний ККД насоса приймається лише максимальне значення ККД за номінальної частоти обертання робочого колеса насоса. Інші значення ККД насоса за номінальної частоти обертання задаються звичайно у вигляді дослідних кривих і приводяться в каталогах насосів.

Залежність значення ККД від значень подачі при сталій номінальній частоті обертання для найбільш поширених вітчизняних насосів середньої та великої потужності сформульована емпірично

$$\eta^* = \frac{\eta}{\eta_{ном}} = 1 - (1 - Q^*)^{2.3}. \quad (14)$$

Перевищення напору є однією з причин виникнення втрат електроенергії в насосних установках. Відповідно, слід утримувати таку частоту обертання насоса, при якій в координатах $Q-H$ геометричне місце робочих точок знаходилось би на робочій характеристиці трубопроводу. Спільним рішенням рівняння напірної характеристики насоса та трубопроводу відносно частоти обертання отримали вираз:

$$n = n_{ном} \sqrt{\frac{H_n}{H_\phi} + \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2}, \quad (15)$$

де H_n – статичний напір, H_ϕ – фіктивний напір (фіктивна висота підйому рідини при нульовій подачі); Q_0 – найбільша подача для даної системи.

Робота насоса з частотою обертання, що відповідає рівнянню забезпечує підтримку мінімальних значень напору на виході насосної установки на всьому діапазоні зміни подачі. Завдяки ліквідації перевищення напору енергоспоживання насоса зменшується до необхідного мінімуму.

При регулюванні частоти обертання відповідно з зниження енергоспоживання за абсолютним значенням дорівнює втратам, що мають місце при перевищенні напору під час роботи насосів зі сталою частотою обертання.

4. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ПІДЧАС ЕНЕРГОАУДИТУ НАСОСНИХ СИСТЕМ

4.1 Загальна інформація про витратоміри

Акустичними називаються витратоміри, засновані на вимірюванні залежно від витрати, того або іншого ефекту, що виникає при проходженні акустичних коливань через потік рідини або газу. Майже всі застосовувані на практиці акустичні витратоміри працюють в ультразвуковому діапазоні частот і тому називаються ультразвуковими.

Вони поділяються на витратоміри, засновані на переміщенні акустичних коливань середовищем, що рухається, і витратоміри, засновані на ефекті Допплера, що з'явилися пізніше. Значного поширення одержали прилади, засновані на вимірювання різниці часу проходження акустичних коливань за потоком й проти нього. Значно рідше зустрічаються прилади, у яких акустичні коливання направляються перпендикулярно до потоку й вимірюється ступінь відхилення цих коливань від первісного

напрямку. Прилади, засновані на явищі Доплера, призначені в основному для вимірювання місцевої швидкості, але вони знаходять також застосування й для виміру витрати. Вимірювальні схеми в них більше прості.

Поряд із трьома зазначеними різновидами ультразвукових витратомірів є акустичні витратоміри, що одержали назву довгохвильових, працюючі у звуковому діапазоні частот акустичних коливань.

Ультразвукові витратоміри зазвичай служать для вимірювання об'ємної витрати, оскільки ефекти, виникають при проходженні акустичних коливань через потік рідини або газу, пов'язані зі швидкістю останнього. Шляхом додавання акустичного перетворювача, що реагує на густину вимірювання речовини, можна здійснити й вимір масової витрати. Наведена похибка ультразвукових витратомірів лежить у широких межах від 0,1 до 2,5 %, але в середньому може бути оцінена як 0,5...1 %. Значно частіше розглядаються витратоміри, що застосовуються для вимірювання витрати рідини, а не газу, внаслідок малого акустичного опору останнього й труднощі в одержанні в ньому інтенсивних звукових коливань. Ультразвукові витратоміри придатні для труб будь-якого діаметру, починаючи від 10 мм і більше.

Існуючі витратоміри дуже різноманітні як за будовою первинних перетворювачів, так і застосовуваних вимірювальних схемах. При вимірюванні витрати чистих рідин звичайно застосовують високі частоти (0,1...10 МГц) акустичних коливань. При вимірюванні ж забруднених речовин частоти коливань доводиться істотно знижувати аж до декількох десятків кілогерц, щоб уникнути розсіювання й поглинання акустичних коливань. Необхідно, щоб довжина хвилі була на порядок більше діаметра твердих часток або повітряних бульбашок. Низькі частоти застосовують також при вимірюванні витрати газів.

Також використовують фазові ультразвукові витратоміри, що засновані на залежності фазових зміщень ультразвукових коливань, що виникають на прийомних п'єзоелементах, від різниці часу проходження цими коливаннями однієї і тієї само відстані у потоку рідини і проти нього.

Частотні ультразвукові витратоміри основані на залежності частот повторення коротких імпульсів чи пакетів ультразвукових коливань від різниці часу проходження цими коливаннями однієї й тієї ж відстані по потоку рідини і проти нього. В залежності від того, вимірюється різниця частот пакетів ультразвукових коливань, що проходять через рідину, витратоміри називаються частотно-пакетними або частотно-імпульсними.

4.2 Використання ультразвукових витратомірів для енергоаудиту

POLYSONICS модель DDF3088 (рис. 13) фірми є переносним доплеровським ультразвуковим витратоміром, призначеним для вимірювання параметрів потоку рідини з зовнішньої сторони трубопроводу. DDF3088 працює від змінних лужних батарей або від нікель-кадмійових акумуляторів. Він знаходиться в герметичному корпусі. Переноситься та керується однією рукою, оснащений надійним двоголовочним датчиком і легко встановлюється на зовнішній стороні трубопроводу.

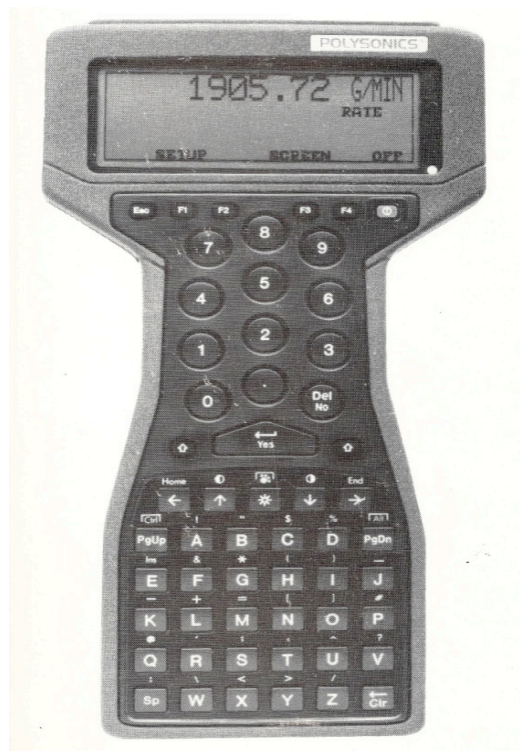


Рис. 13 Ультразвуковий витратомір POLYSONICS DDF3088

Технічні характеристики:

Прилад

- діапазон вимірюваних швидкостей: 0,05 - 32 фути в секунду; 0,02 - 10 метрів на секунду;
- похибка $\pm 2\%$ від швидкості або нижче;
- повторюваність: $\pm 0,05\%$ повної шкали;
- лінійність: $\pm 0,5\%$ повної шкали;
- діаметр трубопроводу: 0,75 дюйма (0,02 м) мінімальний, 300 дюймів (7,6 м) максимальний.

Датчик:

- з двома головками, оснащений дванадцятифутовим (триметровим) кабелем і з'єднанням вилючного типу.

Клавіатура:

- 50 клавішею тактильної дії з оповіщенням. Окремі літерні й цифрові клавіатури.

Маса:

Екран:

- 240x64 мінімальних елементів зображення, повні графічні засоби, на рідких кристалах, з убудованим підсвічуванням. 8 ліній x 40 знаків. Програмування для GPM, MGD, FPS, MPS, LPM, й CMD. Дисплей Strip Chart для даних у масштабі реального часу й реєстрованих файлів. Дисплей часових і частотних доменів.

Індикація рівня сигналу:

- Дисплей частотного домену й стовпчикова діаграма.

Метод аналізу:

Цифрова обробка сигналу.

Ємність:

- 100000 інформаційних одиниць. Програмне забезпечення для ПК стандартне із засобами зв'язку.

Експлуатаційна температура:

- Приклад: -22° до 130°F (-30° до $+55^{\circ}\text{C}$)
- Приклад: -30° до 300°F (-35° до $+150^{\circ}\text{C}$)

Матеріал корпусу:

- Магнієвий сплав.

Джерела живлення:

• Тип: 3 х АА лужні (стандартні), 3 х А нікель-кадмійові акумулятори додатково).

- Термін роботи 8 годин (лужні).

Маса:

- 1,6 фунта (0,75 кг).

Опис устаткування

- водонепроникне;
- можливість вимірювання швидкості потоку 0,05 фута в секунду;
- реєстрація 100000 одиниць виміру;
- рідиннокристалічний дисплей з високою роздільною спроможністю;
- компактність/невелика вага;
- серійний інтерфейс RS232.

DDF3088 ідеально підходить для роботи поза приміщеннями для промислового застосування, де потрібна свобода рухів у тісних умовах роботи. Витратомір вміщається на долоні й при вазі 750 г легко кріпиться на поясному або ручному ремені. Прилад комплектується окремими цифровими й буквеними клавіатурами, екран має високу розподільчу спроможність в 8 ліній на 40 знаків, підсвічування, а також графічний дисплей з 240 x 64 мінімальними елементами зображення.

Удосконалене цифрове оброблення сигналу (DSP) застосоване в DDF3088. Технологія DSP (цифрової обробки сигналу) дозволяє приладу вимірювати більш чисті рідини й знизити поріг вимірювання швидкостей у порівнянні з попередніми доплерівськими витратомірами.

Корпус DDF3088 з магнієвого сплаву являє собою винятково легку й міцну конструкцію, здатну протистояти необережному поводженню й суворим погодним умовам. Він пиловологонепроникний і відповідає ряду військових й екологічних стандартів на стійкість до ударів, вібрації й температури.

Реєстрація об'єктових даних

В DDF3088 убудований потужний реєстратор даних, здатний реєструвати 100000 одиниць інформації з витрати при інтервалах 1 секунду або більше. Результати технічних вимірюванні зберігаються в довгостроковій пам'яті й можуть передаватися на ПК пізніше для аналізу та класифікації.

Окрема функція запам'ятовування дозволяє зберігати до 16 наборів структурної й параметричної інформації. Це дозволяє уникати повторного введення інформації при поверненні на об'єкт. DDF3088 може програмуватися для автоматичного початку й зупинки зняття показів в установлений час при автономній експлуатації.

Прилад забезпечує наявність цілого ряду графічних і буквено-цифрових методів відображення в метричних або британських одиницях для спрощення аналізу витрати. Відображення включає цифрові данні, графіки, реєстрацію даних, частотні й тимчасові домени, а також рівень сигналу. Це спрощує визначення й видалення перешкод, які можуть призвести до значних помилок. Керована меню експлуатація DDF3088 полегшує програмування, введення даних і вибір функцій.

Додаткове устаткування

Витратомір Polysomes Модель DDF3088 забезпечується повним набором пристосувань, достатніх для реалізації більшості функцій для виміру витрат. Для особливих випадків передбачений комплект додаткових пристосувань. Загальний вигляд зображений на рис. 14.

Принцип дії

В 1843 році Кристіан Допплер висунув концепцію, що існує видима зміна частоти звуку, світла або радіохвиль як функції руху. На цьому заснований принцип дії доплеровських витратомірів; вони складаються з датчика, доплеровського частотного приймача й передавача. Датчик являє собою герметичну зборку, що встановлюється із зовнішньої сторони трубопроводу, і містить прийомний і передавальний кварци. Ці кварци встановлюються в одній головці або поставляється спеціальна

двуголовочна конфігурація. Передавальний кварц посилає безперервний ультразвуковий сигнал крізь стінку труби всередину потоку рідини.

Коли передана частота відбивається від зваженої частки, пухирця повітря, розриву або збурювання потоку й приймається прийомним кварцом, зареєстрована зміна частоти буде пропорційна швидкості рідини. Твердотілий приймач точно вимірює різницю між переданою та прийнятою частотою й відбиває цю різницю на індикаторі швидкості потоку в одиницях швидкості.

Допплеровські витратоміри призначені в основному для виміру швидкості шламів, гідросумішей, каналізаційних стоків, стічних вод, технологічних потоків хімічних речовин й інших рідин, що містять суспензії. Під час відсутності достатньої кількості твердих часток еквівалентна кількість повітряних або газових пухирців дасть точні показання. У деяких моделях витратомірів Polysonics потрібна присутність тільки збурювань, викликаних перепадом тиску, фланцями або поверхнею стінки труби.

У цілому доплерівські витратоміри проводять виміри на трубопроводах фактично будь-якого діаметра, в яких рухаються рідини з мінімальною швидкістю 0,15 м/с при відповідних умовах.

Вимірювання швидкості потоку з використанням доплерівського ефекту широко застосовується багато років. Рідини, що містять тверді частки або газові пухирці, є ідеальними відбивачами ультразвукових сигналів. Рух цих відбивачів у рідинах дає сигнали з доплерівським зміщенням, яке використовується при вимірі швидкості потоку.

Допплерівські сигнали від "брудних" рідин містять порівняно вузький діапазон частот, які при правильному усередненні забезпечують досить точне визначення швидкості потоку.

В міру того, як рідина стає чистіше або кількість відбивачів зменшується, ультразвуковий сигнал проходить більшу відстань від точки виміру та відбиває більшу кількість частот. Ультразвуковий промінь буде відбиватися від стін по численних траєкторіях. Ці траєкторії променів на передавальній частоті створюють частоти з доплерівським зміщенням,

коли вони перетинають границі розділу, що переміщуються всередині рідини.

Ці границі всередині рідини широко відомі як хвиля зміщення або стрибок тиску, завихрення або вихри, що були викликані перешкодами всередині самого трубопроводу. При обтіканні рідиною цих перешкод (звуження, відкриті клапани, відгалуження) з'являються доплерівські сигнали. Якщо рідина чиста, наприклад, вода з артезіанських свердловин, ультразвукові сигнали йдуть від багатьох ділянок трубопроводу, що перебувають у декількох футах від точки виміру. Допплерівські частоти в чистій воді можуть різко відрізнитися від тих же частот у забрудненій воді. Допплерівські сигнали чистої води вимагають спеціального спектрального аналізу, фільтрувальних й аналітичних схем для одержання точних показань швидкості потоку.

Допплерівські прилади для забруднених рідин не вимагають спеціальних схем. Завдяки досвіду декількох років робіт і перевірки нових ідей вдалося розробити схеми спектрального аналізу, призначених винятково для виміру швидкості потоку з використанням доплерівського ефекту.

Ряд факторів можуть вплинути на результати роботи доплерівських витратомірів при використанні на фактично чистих рідинах. Можливо буде потрібно вибрати й протестувати кілька місць розташування датчиків на одній трубі. Тому конфігурація трубопроводів має важливе значення. Місця установки датчиків можуть перебувати далеко від вентилів, місць звуження труб й інших ділянок, що впливають на швидкість потоку, для того, щоб уникнути реєстрації завищених частот цими приладами. Рекомендується протестувати на місці будь-яку нову функцію при фактичних значеннях витрати.

Виділення сигналу

Очевидним недоліком більшості доплерівських функцій є необхідність наявності пухирців або зважених часток у рідинах для відбиття ультразвукових сигналів. З огляду на цей недолік, деякі виробники намагаються розробити доплерівські прилади, здатні

вимірювати більш чисті рідини. Одним з підходів є застосування більш високих частот. Однак це не дозволяє вирішити всі проблеми вимірювання швидкості чистих рідин. Більшість доплерівських приладів використовують передавальну частоту приблизно 0,6 МГц.

Більш високі передавальні частоти завдяки меншій довжині хвилі теоретично повинні дати підвищене відбиття від малорозмірних часток і тому повинні бути логічним вибором для чистих рідин. На практиці високі частоти не виправдали надій, тому що вони більше чутливі до випадкових збурювань у потоці, доплерівське відбиття більше, однак зростає чутливість до завихрень і т.п. Використання значно нижчих частот при більшій потужності має свої переваги, тому що частка бажаних доплерівських сигналів зростає. Поліпшення обробки сигналів може зробити частоти більш 2 МГц застосовними й ефективними, однак існуючі обмеження змушують застосовувати частоти менш 1 МГц.

Поза залежністю від частоти передачі, експерименти зі схемами високої чутливості та співвідношенням сигнал-шум показали, що доплерівські сигнали присутні в чистих рідинах. Труднощі полягають у тому, що іноді ці сигнали не дають точних величин витрати. Поступово було досягнуто розуміння даних факторів, а нові методи обробки сигналу дають надію на одержання застосовних показань по рідинам, які раніше вважалися занадто чистими для вимірювань.

Створений за останнім словом техніки доплерівський витратомір здатний реєструвати спектр частот у більш чистих рідинах при певних умовах. Він використовує сигнали доплерівського зсуву, створювані збурюваннями в рідинах на додаток до звичайно виникаючих від зважених часток або пухирців повітря. Витратоміри Polysoms серії MASTER проводили вимірювання у відповідних умовах рідин із чистотою, що відповідає деіонізованій воді. На відміну від первісних схем, які просто збирали й усереднювали доплерівські сигнали, удосконалена схема DDF3088 дозволяє аналізувати доплерівські сигнали й приймати рішення, які з них потрібно перетворювати в покази швидкості.

Останні нововведення:

Були зроблені значні технологічні вдосконалення трьох складових частин, необхідних для доплерівського вимірювання витрати:

1. Створення збурювань у рідинах;
2. Виявлення /збір доплерівських сигналів;
3. Обробка сигналів /збирання доплерівських сигналів.

Створення збурювань у рідинах:

Більш високий рівень рідини, створюваний за допомогою високочастотної енергії, був досягнутий шляхом підняття ефективної потужності передачі, застосуванням більших кварців. Робота на більш високому рівні енергії допомагає перебороти опір матеріалу трубопроводу для передачі звукової енергії. Це в свою чергу дозволяє більшій кількості ВЧ-енергії проникнути в рідину, що сприяє її реєстрації, підвищує рівень доплерівських сигналів і зменшує вплив матеріалу трубопроводу. У цілому, підвищення рівня збурювань у рідині містить у собі також підвищення потужності передачі на низьких частотах, що дозволяє:

А. Перебороти вплив опору матеріалу трубопроводу.

В. Вводити більше ВЧ-енергії в рідину для підвищення якості доплерівських сигналів.

С. Знизити реєстрацію небажаних сигналів, наприклад, вібрацій та інших перешкод, які звичайно легше фіксуються на високих частотах.

Виявлення/збір доплерівських сигналів

Частіше приймальні кварци застосовуються для спільної роботи з передавальними кварцями. Фактично вони працюють як антена для приймання сигналів з доплерівським зсувом. Застосовуються також нові інтегральні схеми для полегшення збирання доплерівських частот.

Оброблення сигналів частотного спектра

Методика цифрового фільтрування, включаючи відстеження доплерівських сигналів, дозволяє відсівати непотрібні частоти й зберігання «дійсні» доплерівські частоти потоку.

Останні доплерівські конструкції конструкції містять у собі схему від фільтрування «шумів», що здатна відрізнити «дійсні» доплерівські

сигнали від помилкових. Термін «шум» визначається як всі інші сигнали, що є присутніми у трубопроводі й рідині, які відрізняються від «дійсних» доплерівських.

Частотний спектр

Дійсно доплерівські сигнали, отримані від руху рідини й пухирьців, що втримуються в ній, і часток через ультразвукове поле, створене передавальним кварцом, створює так званий «доплерівський зсув».

Лише сигнали, що пройшли повний спектральний аналіз, перетворюються показниками швидкості потоку рідини. Результатом є досягнута точність в $\pm 2\%$ фактичного відкаліброваного діапазону втрати.

Це значно краще, ніж у попередніх зразків, у яких похибка досягла 10-15%.

Вимірювання із зовнішньої сторони

Доплерівські витратоміри прості в установці й експлуатації. Датчик встановлюється на зовнішній стороні труби за допомогою кріпильної пасти й кріпильних ременів. Постійно встановлені прилади попередньо калібруються на заводі відповідно до діаметру трубопроводу й діапазону витрат. Прилади кріпляться на стіні та підключаються до джерела живлення. Звичайно складне налагодження й калібрування не потрібне. Вимірювання витрати рідини із зовнішньої сторони за допомогою доплерівського витратоміра є одним з найважливіших показників дозволяючих ефективно використати устаткування. Оскільки датчик розташовується із зовнішньої сторони трубопроводу, доплерівський витратомір має наступні переваги:

- немає перепаду тиску;
- внутрішні вузли не кородують і не забруднюються;
- не потрібно змін у трубопроводах і перехідниках;
- легко встановлювати й переносити в робочих умовах;
- тому що цілісність трубопроводів не порушується, викид токсичних хімікатів, бактерій або інших рідких забруднювачів виключається.

Ці переваги мають велике значення для керівництва й експлуатаційного персоналу в досягненні рентабельності.

Інші функції ультразвукового витратоміра

1. Відсутні рухливі деталі, здатні до зношування або поломки.
2. Датчик має надійну конструкцію й може встановлюватися в корпусах для зниження ризику ушкоджень. Він користується згідно власних стандартів безпеки.
3. Корпуси електронних вузлів відповідають стандарту NEMA 4X (стійкість до корозії) для роботи в будь-яких погодних умовах (Є вибухостійкі корпуси).
4. Електронні компоненти відповідають промисловим стандартам якості.
5. Проста установка/переміщення доплерівських витратомірів і нескладний порядок експлуатації полегшують навчання експлуатаційного персоналу.

Доплерівський витратомір може вимірювати швидкість потоків до менш 1 фути в секунду із зовнішньої сторони трубопроводу з похибкою $\pm 2\%$ повної шкали. Це робить його зручним для вимірювання потоку хімікатів, підтримки системного балансу й забезпечення інформацією самописців як складової частини контуру регулювання. Доплерівські витратоміри є різних конфігурацій, включаючи стаціонарні й переносні моделі. Є ряд додаткових функцій, які забезпечують:

- швидкість потоку (в одиницях швидкості або обсягу);
 - загальну витрату (у галонах, барелях, кубічних метрах і т.д.);
- розмикання контактів у випадку позаштатної ситуації;
- аналогові вихідні дані, пов'язані з витратою;
 - імпульсні вихідні дані пов'язані із загальною витратою;
 - здатність пропорційного відбору проб/дозування;
 - дотримання стандартів безпеки по вибухонебезпечності NEMA-4X, NEMA-7 (на деяких моделях).
- Вимірювання швидкості потоку з використанням доплерівського ефекту широко застосовується багато років. Рідини, що містять тверді частки або газові пухирці, є ідеальними відбивачами ультразвукових

сигналів. Рух цих відбивачів у рідинах дає сигнали з доплерівським зсувом використовувані при вимірюванні швидкості потоку.

Допплерівські сигнали від "брудних" рідин містять порівняно вузький діапазон частот, які при правильному усередненні забезпечують дуже точне визначення швидкості потоку.

В міру того, як рідина стає чистішою або кількість відбивачів зменшується, ультразвуковий сигнал проходить більшу відстань від точки вимірюються відбиває більшу кількість частот. Ультразвуковий промінь буде відбиватися від стін по численних траєкторіях. Ці траєкторії променів на передавальній частоті створюють частоти з доплерівським зсувом, коли вони перетинають границі розділу, що переміщаються усередині рідини.

Ці границі всередині рідини широко відомі як хвиля зсуву або стрибок тиску, завихрення або вихри, що були викликані перешкодами всередині самого трубопроводу. При обтіканні рідиною цих перешкод (звуження, відкриті клапани, вигини й відгалуження) з'являються доплерівські сигнали. Якщо рідина чиста, наприклад, вода з артезіанських свердловин, ультразвукові сигнали йдуть від багатьох ділянок трубопроводу, що перебувають у декількох футах від точки вимірювання. Допплерівські частоти в чистій воді можуть разюче відрізнитися від тих же частот у забрудненій воді. Допплерівські сигнали чистої води вимагають спеціального спектрального аналізу, фільтрувальних й аналітичних схем для одержання точних показів швидкості потоку.

Допплерівські прилади для забруднених рідин не вимагають спеціальних схем. Завдяки досвіду декількох років робіт і перевірки нових ідей удалося розробити схеми спектрального аналізу, призначених винятково для вимірювань швидкості потоку з використанням доплерівського ефекту.

Ряд факторів можуть вплинути на результати роботи доплерівських витратомірів при використанні на фактично чистих рідинах. Можливо буде потрібно вибрати й протестувати кілька місць розташування датчиків на одній трубі. Тому конфігурація трубопроводів грає важливе значення.

Місця установки датчиків можуть перебувати далеко від вентилів, місць звуження труб й інших ділянок, що впливають на швидкість потоку, для того, щоб уникнути реєстрації завищених частот цими приладами. Рекомендується протестувати на місці будь-яку нову функцію при фактичних значеннях витрати.

Трубопроводи

Деякі трубні матеріали проводять ультразвуковий сигнал краще, ніж інші. Наприклад, бетонні труби більш пористі і як більшість литих армованих труб мають високий ступінь затухання. Такі матеріали як чавун, сталь, полівінілхлорид, пластмаси й алюмінії добре проводять звук і цілком підходять для використання ультразвукових приладів.

Деякі внутрішні покриття, наприклад, з кам'яновугільної смоли, викликають зайве переломлення ультразвукових хвиль. Переломлення призводить до помилки, яку можна виправити застосуванням отриманої експериментальним шляхом математичної константи для зазначеної швидкості.

Для об'ємних розрахунків необхідне знати значення внутрішнього діаметру трубопроводу. Як не дивно, це джерело частих помилок, тому що в багатьох випадках неможливо одержати точні дані. Відкладення, особливо в старих трубах значно зменшують поперечний переріз труб, що призводить до більше високих, чим фактичні, показанням доплерівського витратоміра. Відкладення також знижують рівень сигналу. Наприклад, відкладення солей кальцію, звичайні для трубопровідних систем, можуть повністю блокувати проходження ультразвукових сигналів. До тогож труба повинна бути наповнена рідиною

Матеріали труб/внутрішні покриття:

1) Відмінні провідники ультразвукових хвиль:

- полівінілхлорид;
- пластмаси;
- алюміній;
- чавун;
- вуглеродиста сталь;

- ковкий чавун;
- епоксидне/цементне покриття.

2) Звичайно добрі провідники:

- нікель;
- пластмаси, армовані склопластиком;
- литі матеріали з армуванням;
- нержавіюча сталь.

3) Погані провідники:

- мідь;
- бетон;
- мідно-нікелеві сплави;
- вставні лейнери, що не прилягають щільно до внутрішньої поверхні труби.

Вимірювання потоків

Визначення достатності великих відбивачів для потрібного рівня повернення ультразвукових сигналів ускладнене без попереднього тестування; це у випадку, якщо ми не працюємо зі значеннями значно більшими, ніж мінімально необхідні. Причина в тім, що у всіх потоках присутній шум, частина якого сприймається витратоміром й обробляється як доплерівський сигнал. Тому ми працюємо скоріше зі співвідношенням сигнал - шум, ніж тільки з відбитим доплерівським сигналом. чим більший шум, тим більше відбивачів необхідно за інших постійних умов. Відфільтрування шумів та, відповідно, підвищення співвідношення сигнал - шум є функцією конкретної схеми витратоміра. Жоден з виробників не згадує про вимоги щодо співвідношення сигнал - шум, можливо, тому що це співвідношення невідомо. Серія Hydra фірми Polysonics має відмінні схеми фільтрування шумів у порівнянні з іншими ультразвуковими витратомірами. У цьому причина того, що прилад може працювати з "чистими" потоками. Фактично, за певних умов, наприклад, при низькому рівні шумів і при достатніх збурюваннях потоку приладу не потрібна наявність твердих часток або пухирців.

Епюра потоку

Як вказувалося вище, на всі витратоміри впливають епюри потоків. В ультразвукових витратомірах вимірювана величина потоку є середня величина всіх отриманих доплерівських частот. Звичайно найменший зсув частот відмічається сигналах, одержуваних біля стінки труби, найбільший - у центрі. Теоретично епюра потоку може визначатися розрахунком числа Рейнольдса, однак на практиці вигини, вентилі й т.п. викликають збурювання. Фірма Polysomes рекомендує встановлювати датчики керуючись здоровим інженерним змістом, те ж стосується будь-яких витратомірних приладів. Вивчення кожного місця установки дозволить прийняти остаточне рішення.

Необхідні умови

У цілому, для виміру потоку за допомогою ультразвукового витратоміра повинні дотримуватися наступні параметри:

- потік повинен являти собою рідину;
- для одержання найбільш достовірних даних трубопровід повинен бути наповнений рідиною;
- матеріал трубопроводу повинен пропускати ультразвукові сигнали;
- повинні бути присутнім у відбивачі ультразвукових сигналів, щоб одержати уявлення про швидкості потоку.

Прикладами таких відбивачів є:

- зважені тверді частки;
- газоповітряні пухирці;
- збурювання у потоці;
- розриви потоку.

Для точних вимірювань повинна визначатися епюра потоку. Звичайно це вимагає прямих ділянок трубопроводів вище й нижче точок вимірювання, залежно від характеристик рідини й умов проходження потоку.

Швидкість потоку повинна бути вище зазначеного мінімуму, звичайно більше 0.15 м/с.

4.3 Використання приладу KROHNE для енергоаудиту

Звукова хвиля, направлена за напрямком руху потоку, рухається швидше, ніж хвиля, направлена в протилежному напрямку.

Цей принцип використовується в ультразвукових витратомірах, наприклад ALTOSONIK UFM 610 P Portable system (рис. 14). Два ультразвукових передавачі - приймачі розташовуються із двох сторін труби. Спочатку, прилад А посилає ультразвуковий сигнал, що буде отриманий приладом В. Вимірюється час t_{ab} між відправленням й одержанням сигналу. Потім функції приладів змінюються, і знову вимірюється час t_{ab} .



Рис. 14 Зовнішній вигляд приладу KROHNE для енергоаудиту

При розрахунку витрати враховуються наступні фактори:

- діаметр труби;
- товщина стінки труби;
- товщина обшивки труби;
- швидкість звуку в рідині;
- швидкість звуку в матеріалі стінки;
- швидкість звуку в матеріалі обшивання.

Мікропроцесор контролює датчики через аналогово-цифровий інтерфейс. Введення параметрів здійснюється клавіатурою. Дисплей на рідких кристалах є індикатором всіх вимірюваних величин.

Всі зібрані на об'єкті дані можуть зберігатися в пам'яті, і переноситься в спільний IBM PC через інтерфейс RS 232, це ставиться й до встановлених параметрів.

За необхідності копія збережених даних може бути отримати через вбудований принтер.

Поточні й частотні вихідні сигнали доступні з метою контролю.

Можливе використання й зовнішніх, і внутрішніх джерел енергії.

Керування й з'єднання

Панель управління витратоміра.

1. Дисплей на рідких кристалах.
2. Клавіатура.
3. Вхід 12 В постійного струму.
4. Вхід 90-240 В змінного струму
5. Головний вимикач.
6. Контакт датчика, розташованого вище по потоці.
7. Контакт датчика, розташованого нижче по потоці.
8. Вихід RS 232 для процесора.
9. Селектор для принтера або вихід RS 232.
10. Вихід частотного сигналу.
11. Вихід поточного сигналу.
12. Принтер.
13. Кнопка подача паперу.

Дисплей і зберігання даних

Можливі наступні опції:

- напрямок і величина потоку;
- загальне значення прямого й зворотнього потоку з моменту початку вимірювання;
- абсолютне значення потоку з моменту початку вимірювання;
- час проходження сигналу;

- повідомлення про помилки;
- самовимкнення дисплею.

Внаслідок того, що дисплей показує тільки одну з перерахованих вище величин, переглядати їх потрібно по черзі.

Збір даних:

Через заданий проміжок часу вся інформація про потік, а також установка параметрів, може зберігатися, роздруковуватися й/або відсилатися на РС через вихід RS 232. Продуктивність принтера програмується, однак тривала робота істотно скорочує строк служби батарейок. Тому рекомендується рідше використовувати принтер на об'єкті.

Рекомендується робити наступне:

На об'єкті:

- зберігати тільки дані по потоку;
- використовувати принтер тільки для перевірки параметрів, якщо в цьому є необхідність.

В офісі рекомендується робити:

- підключати прилад до мережі;
- дані на РС посилати через вихід RS 232;
- використовувати принтер при необхідності (низька продуктивність).

Живлення приладу

Витратомір живиться від трьох джерел:

- акумуляторів, які автоматично підзаряджаються, як тільки прилад включається в мережу змінного або постійного струму;
- мережі змінного струму 90...264 В (50/60 Гц);
- автомобільних акумуляторів 12 В постійного струму.

Коли прилад вимкнений, дані зберігаються в пам'яті, що підтримується аварійними батарейками плати мікропроцесора. Цими батарейками можна підтримувати ОЗУ протягом 5 років.

Основними етапами інсталяції витратоміра є:

- установлення монтажних рейок на трубу;

- програмування потрібних параметрів за допомогою Start Up Menu для того, щоб мікропроцесор міг розрахувати відстань між датчиками;
- установка датчиків на монтажні рейки, відповідно до розрахованої мікропроцесором відстані;
- виконати калібрування нульової точки.

Програмування параметрів

Після того як витратомір відключили, активується Start Up Menu. У цьому меню програмуються застосовувані в роботі параметри. Після натискання на будь-яку клавішу включається дисплей. Всі функції, описані в розділі Start Up Menu, з'являються по черзі, а саме після завершення однієї функції наступна з'являється на дисплеї автоматично.

Функції клавіш.

При натисканні клавіші "Стрілка праворуч" параметр, показаний на дисплеї, буде активуватися, можна ввести бажане значення або вибрати опцію.

Після натискання клавіші "Введення" запрограмована інформація зберігається, програма переходить до наступного параметра.

Для введення цифр або букв використовується клавіша «Стрілка – вгору» - мерехтить наступна по рахунку цифра або наступна буква алфавіту. Якщо натиснути цю клавішу у вимірювальному режимі, дисплей буде світитися протягом години.

Після активації функції, що самовиключається, дисплеїв режимі вимірювання необхідна змінна повинна бути знову вибрана натисканням «Стрілка нагору», якщо у функцію 1.2.0 запрограмована більш ніж одна змінна й у функції 1.2.6 вибрано НЕМАЄ.

Введення значень.

Введення значень, які виходять за межі діапазону, приводить до появи повідомлення про помилку, при цьому мінімальна або максимальна припустима величина з'являється над повідомленням про помилку. Після натискання будь-якої клавіші функція знову активується, й можна ввести правильне значення.

Меню СТАРТ

Введіть всі застосовані параметри в меню СТАРТ для докладної інформації. Продовжуйте доти, поки на дисплеї не з'явиться відстань між датчиками. Тепер можна встановлювати датчики.

Калібрування нульової точки

Витратомір функціонує, не показуючи на дисплеї яких-небудь даних щодо потоку. Маркер низького сигналу буде свідчити про те, чи можливо калібрування нульової точки.

Калібрування нульової точки рекомендується виконати для того, аби підвищити точність показів. Якщо калібрування нульової точки не проводиться можна почати збір даних або ввести інші параметри через режим програмування.

Перед калібруванням переконайтеся в тому, що:

- прилад правильно функціонує;
- немає потоку в місці установки датчиків, секція труби повністю заповнена рідиною.

Далі активуйте меню СТАРТ та введіть функцію ZERO SET:

- натисканням «Стрілка вправо» з'явиться DEFAULT або MEASURED;

- використовуючи "Стрілка нагору" виберіть DEFAULT або MEASURED;

- якщо вибрати DEFAULT калібрування не проводиться, натисніть "Введення";

- якщо вибрати MEASURED натисніть «Введення»;

- тепер з'явиться NO;

- використовуючи «Стрілка вгору» виберіть YES і натисніть «Введення»

- мікропроцесор тестує вхідний сигнал;

- на верхній лінії з'явиться коректування в %;

- якщо коректування близько 0%, то калібрування пройшло успішно.

Виберіть STORE YES і натисніть «Введення», щоб зберегти калібрування нульової точки.

Якщо правильний сигнал не визначений, з'явиться повідомлення BAD ZERO, і процес треба запустити спочатку.

Меню СТАРТ.

Введення меню СТАРТ.

Меню СТАРТ активується:

- автоматично після включення витратоміра;
- при виході з режиму вимірювань натисканням «Стрілка вправо»;
- при виході з режиму програмування натисканням «Введення» 3 рази.

Збір даних

Процедура збору даних

Всього може зберігатися 390 блоків даних. Дуже важливо встановити корисну комбінацію періоду вимірювань та частоти відліків даних. Якщо коливання витрати незначні можна запрограмувати невелику частоту відліку даних. Якщо коливання витрати значні частота повинна бути вищою.

Зауваження: коли зайняті всі 390 блоків дані більше не будуть зберігатися. Витратомір буде продовжувати нормально функціонувати. Попередження робиться, коли заповнені 350 блоків.

Коли починається нова серія вимірювань, блоки даних можна очистити. Це робиться двома способами:

- 1) використовуючи функцію RESET DATA у програмувальному режимі;
- 2) виводом меню QUIT/RESET з вимірювального режиму й вибравши опцію RESET DATA.

По можливості показання лічильника повинні скидатися на початку вимірювальної серії.

Виведіть меню QUIT/RESET у вимірювальному режимі та виберіть лічильник(и), які потрібно почистити.

Підготовка до нових вимірювань.

Збір даних зі знищенням попередніх:

- 1) Виберіть опцію STORE функції 1.6. 3 у програмувальному режимі.

2) Очистіть ОЗУ за допомогою одного з двох методів, описаних у пункті «Скидання даних».

3) Запустіть вимірювальний режим.

4) По можливості скиньте показання лічильників.

Підготовка до продовження вимірювань:

Рекомендується не активувати опцію STORE функції 1.6.3 у програмувальному режимі до початку періоду вимірювань, інакше непотрібні блоки даних збережуться й займуть багато місця.

Після установки датчиків рекомендується працювати у вимірювальному режимі певний час, протягом якого дані відправляються лише на дисплей (функція 1.6.3 OFF).

Можна перевірити дані та відрегулювати шкалу значень.

Вимірювання зі збереженням даних:

1) Виберіть опцію STORE функції 1.6.3 у програмувальному режимі.

2) Перейдіть із програмувального режиму у вимірювальний за допомогою опції DIAMETER у меню Start Up.

3) По можливості скиньте покази лічильників.

Меню Quit/Reset

У цьому меню можна використати дві функції:

- ERRORLIST. Показує список помилок, позначений у лівій частині дисплея. Якщо вивід помилок на дисплей не запрограмований (функції 1.2.4 й 1.6.4), єдиний спосіб довідатися про помилку - за допомогою значка * у лівій частині дисплея. Натисніть клавішу «Стрілка вправо», число помилок і перше повідомлення з'являться на екрані. Натискаючи клавішу «Стрілка вгору» з'являються інші помилки; вкінці з'явиться функція ERRACQUIT.

- ERRACQUIT. Після ліквідації помилок активуйте функцію ERRACQUIT, використовуючи «Стрілка вправо», і виберіть YES за допомогою «Стрілка вгору», щоб видалити повідомлення й маркер. Навіть якщо причина помилки усунута, повідомлення й маркер не зникнуть, поки не буде використана функція ERRACQUIT.

Слід відмітити, що такі повідомлення відрізняються від тих, які перебувають у блоці даних, що зберігають або посилають на принтер/вихід RS 232 (функції 1.2.4 й 1.6.4): наприкінці інтервалів збору даних ці повідомлення зникають автоматично.

RESET: У цьому підменю можливі три опції:

TOTAL+: скидання + підсумовуючий пристрій (лічильник).

TOTAL -: скидання – лічильник.

RESET DATA: скидання всіх даних з блоків.

У кожній опції є варіанти ТАК чи НІ.

Ці опції використовуються, щоб забезпечити чистий старт збору даних. Використовуючи «Введення», поверніться в режим вимірювань.

CODE: Щоб вийти з режиму вимірів і ввійти в режим Quit/Reset використовується код: «Введення», «Стрілка нагору», «Стрілка вправо».

Хоча код досить простий, але це запобігає ненавмисному скиданню даних. Код набирається протягом 3-4 секунд.

Як програмувати.

Введення режиму програмування:

Режим програмування можна ввести тільки із вхідної позиції DIAMETER меню Start Up: натисніть «Введення» і потім «Стрілку вправо».

У позицію DIAMETER можна потрапити трьома шляхами:

- автоматично після ввмикнення витратоміра;
- якщо наприкінці меню Start Up при виборі режиму вимірів вибрати НЕМАЄ;

- якщо зупинити режим вимірів натисканням «Стрілка вправо».

Вибір головного меню:

При вході в режим програмування на дисплеї з'являється головне меню ІНСТАЛЯЦІЯ, натисканням «Стрілка вгору» вибирається меню ТЕСТ. Обране меню активується натисканням «Стрілка вправо».

Вибір підменю:

Використовується «Стрілка вгору» для вибору підменю з обраного меню. Обране підменю активується натисканням «Стрілка вправо».

Вибір функції:

Використовується «Стрілка вгору» для вибору функції з обраного підменю. Обрана функція активується натисканням «Стрілка вправо».

Введення параметрів і одиниць виміру.

Введення параметрів і одиниць вимірювання вибирається в позиції, позначеної миготливим сигналом, за допомогою «Стрілка вгору». Позиція вибирається за допомогою «Стрілка вправо».

Установка функції закінчується натисканням «Введення», дані зберігаються, виходимо в підменю. Натисканням «Введення» виходимо в головне меню. Завершення програмування.

Завершення програмування можна здійснити також натисканням «Введення» 3 рази поки одне із двох меню не активується. Мікропроцесор запитає чи зберегти зміни. Виберіть ТАК чи НІ, використовуючи «Стрілка вгору», і натисніть «Введення» для повернення в меню СТАРТ. Якщо вибрати ТАК, параметри зберезуться й з'явиться меню СТАРТ. Натисніть «Введення», «Стрілка нагору», щоб увійти в режим вимірювань.

4.4 Витратоміри-лічильники рідини ВЛР2304

Лічильники ВЛР2304 здійснюють індикацію:

- значення витрати рідини у відсотках від найбільшого значення витрати, у м³/год і в л/с;
- значення найбільшої витрати рідини, на який настроєний даний лічильник у м³/год;
- після вмикання живлення в кодованому вигляді умовного внутрішнього діаметра первинного перетворювача даного лічильника й найбільшого значення витрати рідини.

Лічильники мають стандартний послідовний інтерфейс RS232 (далі - інтерфейс), через який можна зчитувати:

- значення витрати рідини у відсотках від найбільшого значення витрати;
- значення витрати рідини в м³/год;
- обмірюваний об'єм рідини наростаючим підсумком у м³.

Лічильники, забезпечують перетворення витрати рідини й вимірювання об'єму рідини через первинний перетворювач за встановлений проміжок часу й наростаючим підсумком з нормованою похибкою в діапазоні від 4 до 100 % вибраної найбільшої витрати, наведеної в таблиці 3, для кожного умовного внутрішнього діаметра первинного перетворювача.



Рис. 15 Зовнішній вигляд витратоміра-лічильника рідини ВЛР2304

Відмінні риси:

1. Вимір витрати й об'єму.
2. Без архіву.
3. Без входів для виміру тиску й температур.
4. У комплекті приладу одна витратомірна ділянка.
5. Наявність струмового, частотно-імпульсного виходу й RS 232.
6. Вимірювально-обчислювальний блок приладу виготовляється в настінному виконанні з індикатором й у щитовому виконанні з індикатором.
7. Найменша інертність при вимірі витрати.
8. Рекомендується для ліній автоматичного регулювання й промисловості, а також для застосування в якості еталонних.

Таблиця 3

Умовний внутрішній діаметр первинного перетворювача, D_n , мм	Орієнтовне значення верхньої межі швидкості рідини, м/с							
	1,0	1,6	2,0	2,5	4,0	6,0	8,0	10,0
	Найбільша витрата, Q_{\max} , м ³ /ч							
6	0,10	0,16	0,20	0,25	0,40	0,63	0,80	1,00
10	0,25	0,40	0,50	0,63	1,00	1,60	2,00	2,50
15	0,63	1,00	1,25	1,60	2,50	4,00	5,00	6,30
25	1,60	2,50	3,15	4,00	6,30	10,00	12,50	16,00
40	4,00	6,30	10,00	12,50	16,00	25,00	40,00	50,00
50	6,30	10,00	12,50	16,00	25,00	40,00	50,00	63,00
80	16,00	25,00	31,50	40,00	63,00	100,00	125,00	160,00
100	25,00	40,00	50,00	63,00	100,00	160,00	200,00	250,00
150	63,00	100,00	125,00	160,00	250,00	400,00	500,00	630,00
200	100,00	160,00	200,00	250,00	400,00	630,00	800,00	1000,00
300	250,00	400,00	500,00	630,00	1000,00	1600,00	2000,00	2500,00
400	400,00	630,00	1000,00	1250,00	1600,00	2500,00	4000,00	5000,00

Примітка. Під найбільшою витратою Q_{\max} мається на увазі значення витрати, при якому лічильники забезпечують свої метрологічні характеристики при безперервній роботі.

Лічильники мають наступні вихідні електричні сигнали:

- частотний з діапазоном від 0 до 10 кГц;
- частотний із заданою ціною імпульсу відповідно до таблиці 2 за замовленням споживача;
- постійного струму, діапазон якого вибирається при замовленні з ряду: 0 - плюс 5, 0 - плюс 20, плюс 4 - плюс 20 ма, причому, найбільшому значенню діапазону зміни вихідного сигналу відповідає 100 % значення витрати;
- стандартні сигнали інтерфейсу RS232.

Примітки

1. Частотний вихід являє собою оптоізольований транзисторний ключ, із відкритим колектором, максимальні напруга й струм навантаження 25В і 10 мА.

2. Частотний вихід із заданою ціною імпульсу має вихід у вигляді нормально розімкнутих контактів реле, $I_{\max} = I$ А; $U_{\max} = 200\text{В}$ постійного струму; $P_{\max} = 15$ Вт.

3. Вихідний сигнал постійного струму гальванічно ізольований і допускає навантаження від 0 до 2,5 кОм для діапазону 0 - плюс 5 мА й від 0 до 600 Ом для діапазонів 0 - плюс 20, плюс 4 - плюс 20 мА.

4. Лічильники за допомогою зовнішнього керуючого сигналу мають можливість вмикання і вимикання режиму виміру об'єму за встановлений проміжок часу з допускним відхиленням $\pm 0,1$ с.

5. Амплітуда зовнішнього керуючого сигналу від 5 до 10В (струм навантаження при цьому від 10 до 25 мА відповідно).

6. Значення витрати рідини у відсотках від його найбільшого значення, у м³/год і в л/с і значення об'єму рідини в м³ і л відображаються на рідкокристалічному восьмизначному індикаторі (далі - індикатор).

До складу лічильників входять:

- первинний вимірювальний перетворювач ЕК фланцевого або різьбового приєднання (далі - первинний перетворювач);
- вимірювально-обчислювальний блок МАР настінного або щитового виконання (далі - обчислювальний блок).

5. ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

5.1 Робоче завдання

Необхідно ознайомитись з роботою і зняти експлуатаційні характеристики відцентрового насоса.

Описання об'єкту енергоаудиту

Схема установки, на якій проводяться випробування відцентрового насоса в лабораторії, наведена на рис. 16.

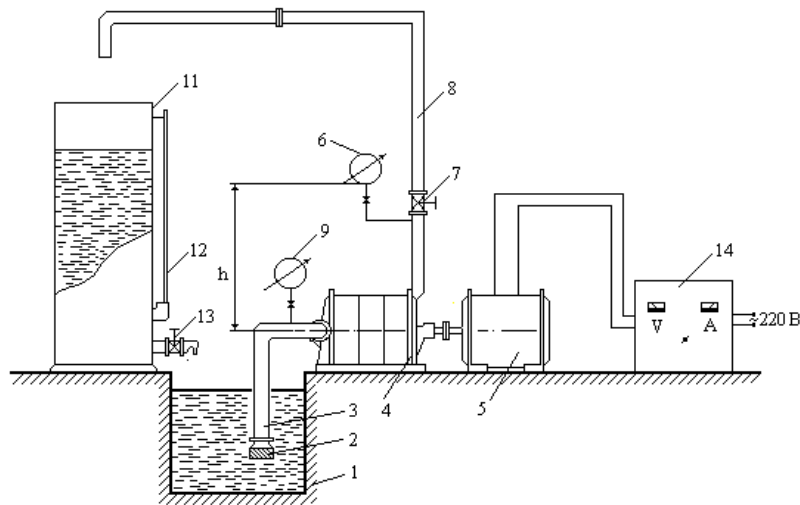


Рис. 16 Схема насосної установки

- 1 – забірний резервуар з рідиною;
- 2 – забірний пристрій;
- 3 та 8 – трубопроводи;
- 4 – відцентровий насос;
- 5 – двигун постійного струму;
- 6 – манометр;
- 7 – засувка регулювання;
- 9 – вакуумметр;
- 10 – вимірювальний резервуар;
- 11 – випрямляч.

Після заливки та пуску насоса 4 в його підводячому патрубці 3 створюється розрідження, й під впливом атмосферного тиску рідина із резервуара 1 по підводячому трубопроводу 3, з забірним пристроєм 2 і зворотним клапаном, надходить у насос. Проходячи через насос, вода набуває запас енергії і по напірному трубопроводу 8 поступає у зливний резервуар 11, що використовується як мірна ємність для точного вимірювання витрати насоса.

5.2 Програма проведення лабораторної роботи

1. Виконання лабораторної роботи з енергоаудиту насосної системи розділяється на чотири етапи: домашня підготовка, робота в лабораторії, аналіз отриманих результатів і складання звіту.

2. Домашня підготовка ґрунтується на освоєнні теоретичного матеріалу й містить у собі:

3. Визначення складових енергобалансу за заданими вихідними даними розрахунково-аналітичним способом і розрахунок ККД НС.

4. Визначення параметрів, які необхідно виміряти при складанні енергобалансу комбінованим способом.

5. Скласти порядок проведення вимірювань певних параметрів, з використанням приладів Polysonics й Rustrak Ranger-II.

Робота в лабораторії містить у собі:

1. Попередній колоквіум з метою перевірки рівня домашньої підготовки.

2. Виміряти продуктивність насосної установки при максимально висунутому шибєрі. Результат вимірювань занести до протоколу.

3. Виміряти величини параметрів, відповідно до порядку. Результати вимірювань занести до протоколу.

4. Аналіз отриманих результатів

5. За результатами вимірювань комбінованим способом скласти фактичний енергобаланс установки й розрахувати її ККД.

6. За результатами вимірювань визначити значення ККД при різному завантаженні розглянутої системи.

7. Побудувати графік залежності ККД установки від її навантаження при існуючому способі регулювання продуктивності.

8. Оцінити ефективність використання енергії досліджуваною установкою шляхом порівняння фактичного ККД установки з наведеним.

9. Зробити висновок про ефективність застосовуваного регулювання продуктивності установки.

10. Розглянути ефективність заміни наявного двигуна на двигун меншої потужності.

11. Розглянути ефективність застосування для регулювання продуктивності установки асинхронного регульованого привода. Звіт про виконання лабораторної роботи повинен містити в собі:

12. Мету лабораторної роботи.

13. Опис об'єкта енергоаудиту, вихідні дані й попередній аналіз обстежуваного об'єкта.

14. Порядок проведення вимірювань і протокол вимірювань.

15. Аналіз отриманих результатів (розрахунки, графіки, т.д.).

16. Висновки.

Контрольні запитання

1. Види та характеристики насосних установок.

2. Приведіть функціональну схему насосної системи.

3. Які способи регулювання насосних установок ви знаєте?

4. Приведіть енергетичну діаграму та енергетичний баланс для насосної системи.

5. Основні заходи підвищення ефективності використання електроенергії в насосних установках?

6. За рахунок чого можна досягти зменшення втрат електроенергії в насосних установках.

7. Які чинники впливають на ефективність впровадження енергозберігаючих заходів?

8. Вимірювальні прилади, що використовуються в насосних установках. Призначення та принцип дії. Описати як проводиться вимірювання.

Література

1. Аракелов В.Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / Аракелов В.Е., Кремер А.И. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.,
2. Закладний О.М. Електропривод / Закладний О.М., Прокопенко В.В., Закладний О.О.; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". — К. : НТУУ "КПІ", 2007. — 316 с.
3. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електроприводу / Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І.; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". — К. : НТУУ "КПІ", 2005. — 408 с.
4. Копытов Ю.В. Экономия электроэнергии в промышленности: Справочник / Копытов Ю.В., Чуланов Б.А. – М.: Энергия, 1978. – 120 с.
5. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Лезнов Б.С. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 144 с.
6. Праховник А.В. Энергетический менеджмент / Праховник А.В., Соловей А.И., Прокопенко В.В.; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". — К. : НТУУ "КПІ", 2001. — 472 с.: ил.
7. Рей Д. Экономия энергии в промышленности: Справочное пособие для инженерно-технических работников. / Рей Д. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с., ил.
8. Степанов В.С. Эффективность использования энергии / Степанов В.С., Степанова Т.Б. – Новосибирск: Сибирская издательская фирма, 1994. – 257 с.