

<https://orcid.org/0000-0002-3923-9495>

<https://orcid.org/0000-0001-6951-4091>

<https://orcid.org/0000-0002-7220-6660>

<https://orcid.org/0000-0002-9364-9495>

<https://orcid.org/0000-0003-1190-0314>

УДК 681.515.8

А.О. МОРОЗОВ*, В.П. КЛИМЕНКО*, О.В. ГЕДЗЬ*, М.Г. ІЄВЛЄВ*, С.Є. МОЙСЕЄНКО*

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СХЕМОЮ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ НОВОБУДОВ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Житлово-комунальне господарство Києва налічує понад 10000 багатопверхових будинків, а Київської області – понад 5000. Скорочення споживання енергоресурсів на потреби утримання житла, послуги тепло- та водопостачання й освітлення слід розглядати як скорочення витрат енергоресурсів. Важливе значення має безаварійна робота обладнання. Його ресурс на багатьох об'єктах комунальної сфери має мінімальний запас міцності. Централізований аналіз контролю обладнання, облік моторесурсу та відповідно вчасно проведені профілактичні роботи дозволяють продовжити термін роботи багатьох вузлів інженерних систем у комунальній сфері, на транспорті, у промисловості. Ці задачі вирішуються розподіленими системами автоматизованого управління інженерним обладнанням, у тому числі системами управління схемою гарячого водопостачання для сучасних новобудов. У сучасних новобудовах поширена схема гарячого водопостачання (ГВП) із двома циркуляційними насосами і регулятором ГВП. Шафа управління, розроблена в ІПММС НАН України, виконана на основі контролера МРТП-7 з відповідним програмним забезпеченням, яке складається із програм загального призначення та програм спеціального призначення. У статті розглянуті принципи побудови системи управління схемою гарячого водопостачання, розглянуто функції програмного забезпечення системи, наведено математичну модель системи ГВП, описано лабораторний полігон для відпрацювання алгоритмів регулювання ГВП та моделювання процесу регулювання ГВП. Викладені у статті науково-технічні рішення можуть бути використані при розробці систем автоматизованого управління інженерним обладнанням у комунальній сфері.

Ключові слова: житлово-комунальне господарство, гаряче водопостачання, шафа управління, інженерне обладнання, комунальна сфера.

Abstract. Housing and communal services in Kyiv have more than 10,000 multi-storey houses, and in Kyiv region, there are more than 5,000. Reducing energy consumption for housing, heat and water supply, and lighting services should be considered as reducing energy costs. The trouble-free operation of the equipment is of the utmost importance. Its resource on many utilities has a minimum margin of safety. Centralized analysis of the equipment control, accounting of motor resources and, accordingly, timely preventive work allow extending the service life of many components of engineering systems in the utility sector, transport, and industry. These problems are solved by distributed systems of automated control of engineering equipment, including control systems of the hot water supply scheme for modern new buildings. In modern new buildings, there is used a scheme of hot water supply (HWS) with two circulating pumps and the HWS regulator. The control cabinet, developed in the IMMSP of the NAS of Ukraine, is made on the basis of the MRTP-7 controller with the corresponding software consisting of general and special purpose programs. The article considers the principles of building a control system for hot water supply, considers the software functions of the system, presents a mathematical model of the HWS system, describes a laboratory test site for testing algorithms for HWP control and modeling the HWS control process. The scientific and technical solutions provided in the article can be used in the development of automated control systems for engineering equipment in the utility sector.

1. Вступ

Житлово-комунальне господарство Києва налічує понад 10000 багатоповерхових будинків, а Київської області – понад 5000. Скорочення споживання енергоресурсів на потреби утримання житла, послуги тепло- та водопостачання й освітлення слід розглядати як скорочення витрат енергоресурсів. Важливе значення має безаварійна робота обладнання. Його ресурс на багатьох об'єктах комунальної сфери має мінімальний запас міцності. Централізований аналіз контролю обладнання, облік моторесурсу та відповідно вчасно проведені профілактичні роботи дозволяють продовжити термін роботи багатьох вузлів інженерних систем у комунальній сфері, на транспорті, у промисловості. Ці задачі вирішуються розподіленими системами автоматизованого управління інженерним обладнанням, у тому числі системами управління схемою гарячого водопостачання для сучасних новобудов [1–4].

Метою статті є опис систем управління схемою гарячого водопостачання для сучасних новобудов.

2. Програмне забезпечення для системи управління схемою гарячого водопостачання

У сучасних новобудовах поширена схема гарячого водопостачання (ГВП) із двома циркуляційними насосами і регулятором ГВП. Шафа управління (ШУ), розроблена в ПІММС НАН України, виконана на основі контролера МРТП-7 з відповідним програмним забезпеченням (ПЗ), яке складається із програм загального призначення та програм спеціального призначення.

До програм загального призначення відносяться:

- 1) операційна система реального часу (ОСРВ);
- 2) програма організації меню рідкокристалічного індикатора (РКІ);
- 3) редактор налагоджувальних параметрів;
- 4) програма запису статистичних повідомлень (ПЗП);
- 5) програма аналогових вимірювань;
- б) програми тестування обладнання ШУ:
 - 6.1) опитування сухих контактів;
 - 6.2) випробування дискретних виходів контролера МРТП-7;
 - 6.3) випробування аналогових виходів контролера МРТП-7;
 - 6.4) випробування кнопок пульта ШУ;
 - 6.5) програма юстування каналів вимірювання температури;
- 7) програма організації зв'язку шаф управління через технологічну локальну мережу зв'язку (ТЛМ).

До програм спеціального призначення відносяться програми управління технологічним обладнанням:

- 1) програма управління циркуляційними насосами ГВП;
- 2) програма управління регулятором ГВП.

Програмне забезпечення ШУ відповідає як діагностичним потребам наладчика ШУ при визначенні і усуненні відмов апаратури ШУ, так і потребам обслуговуючого персоналу для слідкування за роботою обладнання.

Розподіл програмного забезпечення на програми спеціального та загального призначення виконано виключно з методичних міркувань.

2.1. Операційна система реального часу

Це програма, яка організує почерговий запуск усього масиву програмного забезпечення контролера. Саме ця програма визначає розподіл робочого часу контролера і можливі затримки часу реакції контролера на зміну сигналів. Час обслуговування всього програмного масиву не перевищує 20 мс. Це дозволяє використовувати МРТП-7 для задач промислової автоматизації, в яких живлення виконуючих електричних апаратів здійснюється від промислової електромережі (ПМ) 50 або 60 Гц і отже швидкість реакції обмежується не контролером, а часом спрацювання електричних апаратів (реле та магнітні пускачі (МП) мають характерний час спрацювання 100 мс).

Доречно зазначити, що реакція окремих програм може бути значно повільнішою залежно від характеру задачі управління. Швидкість реакції визначається алгоритмом управління. Наприклад, фіксація аварій магнітних пускачів виконується з затримкою часу, яка встановлюється відповідним налагоджувальним параметром (звичайно від 0,2 до 1с).

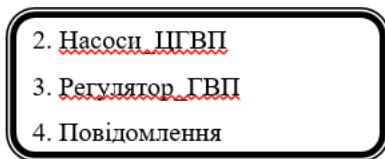
2.2. Меню рідкокристалічного індикатора

Меню – це список розділів, розкриття яких дає можливість оператору спостерігати за допомогою РКІ за станом або перебігом процесів управління або втручатися в перебіг цих процесів, чи змінювати величини налагоджувальних параметрів системи.

Вигляд головного меню наведено на рис. 1. Також на рис. 1 наведена схема розташування кнопок пульта.

bo ГВП: ЦГВП+Рег.ГВП Заголовок головного меню.

1. Загальні параметри



Зсув індикації кн. [↑] і [↓].

Знак “↵” вказує на розділ меню, який буде розкрито при натисканні кнопки [↵]. Для повернення на вищий

рівень меню натисніть кн. [↵].

5. Вимірювання

6. Дата та час

7. Тести

8. Зв'язок

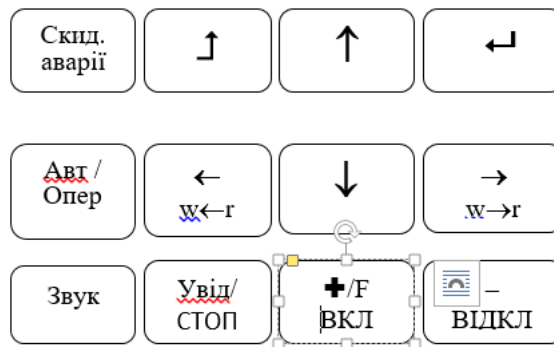


Рисунок 1 – Головне меню та розташування кнопок пульта

[↑], [↓], [←], [→] – кнопки переміщення індикації РКІ або маркера на РКІ;

[←/w←r] – переключення призначень насосів (перший насос із резервного стає робочим);

[←/w→r] – переключення призначень насосів (перший насос із робочого стає резервним);

[↵], [↵] – кнопки входу та виходу з розділів меню ([↵] – збільшує, а [↵] – зменшує глибину вкладення меню);

[+/ВКЛ], [-/ВІДКЛ] – кнопки зміни (відповідно збільшення та зменшення) відміченої маркером величини або включення та відключення чи відкриття та закриття певного механізму;

[Увід/СТОП] – запис (фіксація) значення відміченої маркером величини;

[Скид_аварії] – скидання АВАРІЇ;

[Авт/Опер] – переключення режиму управління з автоматичного на оперативний і навпаки при розкритті меню «Насоси_ЦО» або «Регулятор_ГВП» (ЦО – центральне опалення);

[Звук] – відключення/включення звукового сигналу до виникнення АВАРІЇ;

[+/F] – одночасно з іншою кнопкою змінює її використання при розкритому розділі меню;

[+/F]+[-] – ручний перезапуск (RESET) програми ШУ.

[+/F]+[Увід] – очистка ПЗП повідомлень у розділі меню «Повідомлення».

2.3. Редактор налагоджувальних параметрів

Редактор налагоджувальних параметрів використовується для коригування величин налагоджувальних параметрів. Будь-який розділ меню може мати свої налагоджувальні параметри. Кожного разу, коли оператор натискає кнопку [↵], він збільшує глибину розкриття меню, а при натисканні на кнопку [↑] – зменшує її. Рівень глибини розкриття меню, коли викликається редактор налагоджувальних параметрів, є найглибшим для даного розділу меню. Величини налагоджувальних параметрів можуть бути десятковими беззнаковими, десятковими знаковими числами з фіксованою точкою, дійсними числами або шістнадцятковими цілими числами (байт або слово) у загально прийнятому вигляді 0хАА або 0хАААА. Величини налагоджувальних параметрів можуть бути захищеними від змін встановленням пароля.

2.4. Програма запису статистичних повідомлень. Розділ меню «Повідомлення»

У ПЗП повідомлень записуються 256 повідомлень про останні події (номери з 0 до 255). Після заповнення масиву повідомлень нове повідомлення записується на місце найдавнішого повідомлення. Очистка ПЗП повідомлень виконується одночасним натисканням кнопок [+/F]+[Увід].

Кожне повідомлення має: 1) номер повідомлення; 2) 8 літер, які складають текст повідомлення; 3) дату і 4) час запису повідомлення. Повідомлення складаються з чотирьох рядків. При вході в розділ меню завжди виводиться останнє повідомлення. Для перегляду останнього повідомлення потрібно вийти [↑] і знову увійти [↵] в розділ меню «Повідомлення».

Використовуються такі типи повідомлень: про спрацювання реле контролю послідовності фаз електромережі (РКФ), про сигнал СУХИЙ ХІД, про зміну призначень насосів і про аварії насосів.

2.5. Програма аналогових вимірювань. Розділ меню «Вимірювання»

Розділ меню “Вимірювання” має чотири глибини вкладення: 1) температури; 2) напруги на вході АЦП; 3) опори термодатчиків і 4) налагоджувальні параметри.

Тракт вимірювань температур кожного каналу МРТП-7 вимірює напругу на датчику термоопору, U_{adc} . З величини напруги розраховується опір датчика, R_{dat} . Потім визначається температура по таблиці залежності $T = F(R_{dat})$. У ПЗ закладено дві таблиці: для платинових та нікелевих датчиків.

У контролер МРТП-7 закладено 8 каналів аналогових вимірювань. Призначення каналів дають можливість мати єдину універсальну програму аналогових вимірювань, але, залежно від проєкту, встановлюються різні параметри елементів каналів вимірювання МРТП-7.

2.6. Програми тестування обладнання ШУ. Розділ меню «Тести»

На першій глибині розкриття розділу меню «Тести» виводиться перелік тестів апаратури ШУ.

Тести_контролера_ШУ: 1) «Сухі_контакти»; 2) «Дискретні_виходи»; 3) «Аналогові_виходи»; 4) «Тест_кнопок»; 5) «Юстування_температ».

Тест «Сухі_контакти» призначений для спостереження за даними сухих контактів контролера МРТП-7. Тест «Дискретні_виходи» призначений для перевірки спрацювання дискретних виходів (реле) контролера МРТП-7.

Тест «Аналогові_виходи» призначений для перевірки видачі аналогових сигналів $0\div 10$ В на аналогові виходи МРТП-7.

При розкритті підрозділу «Тест_кнопок» меню на РКІ виводиться позначення кнопок (рис. 2).

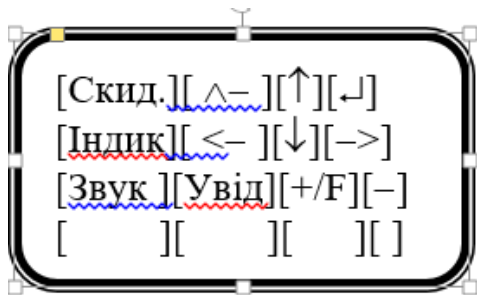


Рисунок 2 – Індикація РКІ підрозділу меню «Тест_кнопок»

На трьох верхніх рядках – позначення кнопок для 12-кнопкового пульта. На четвертому рядку – 4 додаткові кнопки для 16-кнопкового пульта. При натисканні на відповідну кнопку на її місце в індикації РКІ виводяться знаки «*».

Вимірювання температур для датчиків термоопору базується на вимірюванні величини опору датчика. Вимірний опір датчика, $r_{вим}$ перераховується у бажану величину опору, $R_{баз}$ за формулою

$$R_{баз} = kR_i \cdot r_{вим} + dR_i,$$

де i – номер каналу вимірювання температури.

Для юстування можна скористатись двома зразковими резисторами або магазином опору. Підключивши потрібний опір до певного каналу, потрібно зачекати, поки встановиться математичний фільтр вимірювання. Цей процес автоматизований у розділі меню «Юстування_температ».

2.7. Програма організації зв'язку шаф управління через технологічну локальну мережу зв'язку. Розділ меню «Зв'язок»

Розділ меню «Зв'язок» призначений для спостереження за станом ТЛМ із фізичним протоколом RS485 обміну даними між ШУ. Можуть бути різні варіанти побудови такої мережі. У простішому випадку в мережі є ведучий пристрій, який є ініціатором актів обміну даними між ним і іншим веденим пристроєм.

Для систем автоматики надійнішим є циклічний протокол. Це протокол, в якому кожен абонент мережі періодично передає свій пакет даних без запитів від ведучого у відведений для нього часовий інтервал. Відповідно до адрес абонентів вони автоматично встановлюють необхідну для запобігання накладок послідовність передач. Перевага такого протоколу в тому, що: 1) при відмові ведучого вся мережа не діє, а при циклічному протоколі лише втрачається інформація абонента, який випав із мережі (мовою «автоматників» – забезпечується висока живучість системи); 2) за сукупністю передач абонентів у мережі вся інформація про стан обладнання системи може бути доступна для будь-якого абонента, що підвищує гнучкість системи і дозволяє уникати подвійного встановлення датчиків технологічних параметрів, які одночасно потрібні для роботи програм різних ШУ.

2.8. Робота оператора із програмами спеціального призначення

Кожний насос, підключений до ШУ, має три режими управління:

1. Автоматичний – стан роботи насоса визначається алгоритмом програми управління ШУ, в тому числі живлення від перетворювача частоти (ПЧ) або від електромережі ~380В.

2. Дистанційний – стан роботи механізму визначає оператор вручну за допомогою перемикачів на дверях ШУ. Живлення насоса здійснюється від електромережі ~380В. Програма контролера ШУ ігнорує всі сигнали від насоса. В дистанційному режимі вся відповідальність за експлуатацію насоса покладається на оператора.

3. Оперативний – команди управління видаються оператором ШУ при розкритті відповідних розділів меню. Режим призначений для зручності наладчиків апаратури автоматики при перевірці спрацювання електричних апаратів.

2.9. Алгоритм роботи контролера ШУ

Розглянемо роботу циркуляційних насосів і регулятора опалення. Теплоносій із тепломережі проходить через регулюючий клапан опалення, положення якого визначає витрати теплоносія і в кінцевому підрахунку температуру в подавальному трубопроводі ГВП $T_{ГВП}$. Положення регулюючого клапана визначається за даними вимірювання температури $T_{ГВП}$. Режим роботи регулятора ГВП змінюється із включенням та відключенням опалення. Якщо опалення відключене, не діє і перший ступінь бойлера ГВП. Вода нагрівається до температури $55\div 65^{\circ}\text{C}$ від температури холодного водопостачання (ХВП) $8\div 15^{\circ}\text{C}$ приблизно на 40° . Якщо опалення включене, вода нагрівається в першому ступені бойлера ГВП майже до температури $T_{\text{оп}} = 35\div 45^{\circ}\text{C}$ і лише додатково прогрівається приблизно на 10°C . Ураховання сезону роботи виконується встановленням налагоджувального параметра «Сезон» у розділі меню «Регулятор_ГВП».

Циркуляційні насоси Н1 та Н2 забезпечують циркуляцію теплоносія в контурі ГВП будинку, яка запобігає охолодженню води у трубопроводах системи ГВП.

В автоматичному режимі управління одночасно працює лише один насос. Один із насосів призначається робочим, а другий – резервним.

У програмі передбачена можливість включення/відключення насоса центрального гарячого водопостачання (ЦГВП) за температурою зворотного трубопроводу ГВП із метою додаткової економії витрат електроенергії.

Для захисту насосів від сухого ходу передбачена можливість прийому сигналу від дискретного датчика тиску на вході насосів. Передбачена можливість контролю сигналів дискретних датчиків перепаду тиску на насосах, склад налагоджувальних параметрів передбачає можливість використання схеми з одним датчиком перепаду тиску або роботи взагалі без датчиків перепаду тиску.

Нормально працює лише робочий насос. Для забезпечення рівномірного зносу насосів передбачена автоматична зміна призначень насосів (робочий \leftrightarrow резервний) через встановлений час або в заданий час доби.

2.10. Управління насосами циркуляції ГВП

2.10.1. Вхідні та вихідні сигнали

Вхідними сигналами насосів ЦГВП є сигнали сухих контактів і величина температури зворотного трубопроводу ГВП. Вихідними сигналами насосів ЦГВП є сигнал включення їхніх магнітних пускачів. У кожного насоса може бути окремий датчик перепаду тиску або (лише для циркуляційних насосів) може використовуватись спільний датчик перепаду тиску насосної групи.

2.10.2. Алгоритм управління

Якщо пульт контролю і управління (ПКУ) насоса в положенні –А–, встановлюється автоматичний режим управління. При розкритті розділу меню «Насоси_ЦГВП» кнопкою [АВТ/ОПЕР] відмічений маркером «>» насос може бути переключений в оперативний режим управління, в якому він включається кнопкою [+] і відключається кнопкою [-]. При повторному натисканні кнопки [АВТ/ОПЕР] виконується повернення до автоматичного режиму.

Якщо перемикач ПКУ в положенні «-ДИСТ-», насос включається через магнітний пускач безпосередньо перемикачем ПКУ. Програма вважає насос виведеним з автоматичного управління, будь-які аварії насоса не фіксуються. Насос захищений лише автоматом і тепловим реле. Для кожного насоса фіксується сім аварій:

- 1) нема перепаду тиску на включеному насосі;
- 2) є перепад тиску на відключеному насосі;
- 3) МП_380 відключений при наявності команди включення;
- 4) МП_380 включений при відсутності команди включення;
- 5) перегрів електродвигуна насоса;
- 6) сухий хід насоса;
- 7) немає живлення $\sim 380\text{В}$ (за сигналом реле послідовності фаз схеми електричного живлення насосів).

Якщо ПКУ насоса в положенні «-0-» або «-ДИСТ-», фіксація аварій за перепадом тиску і за станом МП не виконується.

Насоси мають призначення робочого і резервного.

Якщо один із насосів переключено в ручний режим управління (на ПКУ «-0-» або «-ДИСТ-» або він переведений в режим [ОПЕР]), другий насос в автоматичному режимі вважається резервним. Якщо обидва насоси в автоматичному режимі управління, їхні призначення довільно визначаються оператором у меню насосів із пульта контролера натисканням кнопки [$\leftarrow/w\leftarrow r$] або [$\rightarrow/w\rightarrow r$].

В автоматичному режимі управління робочий насос постійно працює до виникнення будь-якої аварії. При виникненні аварії замість нього включається резервний насос, який працює, ігноруючи зафіксовані аварії перепаду тиску на ньому. Цей загальноприйнятий алгоритм виходить з відносно малої надійності роботи датчиків перепаду тиску, які можуть відмовити у випадку забруднення трубопроводів системи.

Для рівномірного зносу обох насосів передбачено автоматичне переключення їхніх призначень з періодом $P_{\text{пер}}$. Якщо $P_{\text{пер}}$ кратний 24 (24, 48, 72...), переключення призначень насосів виконується у визначену налагоджувальним параметром «годин:хвилин» хвилину доби для зручності контролю обслуговуючого персоналу за переключеннями насосів. Якщо $P_{\text{пер}}$ не кратний 24, момент переключення постійно змінюється від доби до доби, але така можливість не дуже зручна на практиці.

Переключення насосів (автоматичне або вручну при одночасному натисканні кнопки [$\leftarrow/w\leftarrow r$] або [$\rightarrow/w\rightarrow r$]) виконується з паузою, визначеною налагоджувальним параметром пауза_ПЕРЕКЛ.

Додатковими програмами насосів є їхні лічильники використаного моторесурсу.

Дані лічильників моторесурсу накопичуються в енергонезалежному оперативному запам'ятовуючому пристрої (ОЗП) і можуть бути спотворені при заміні батарейки живлення таймера-календаря. Тому дані лічильників перед заміною батарейки необхідно перенести до журналу обліку моторесурсу.

2.11. Регулятор гарячого водопостачання

2.11.1. Вхідні та вихідні сигнали

Вхідними сигналами регулятора ГВП є сигнали сухих контактів кінцевих вимикачів ВІДКРИТО/ЗАКРИТО, аналогові сигнали температури подавального трубопроводу ГВП і сигнал напруги від реохорду положення регулюючого клапана.

Програма формує вихідні сигнали включення електромоторного приводу регулюючого клапана: 1) ВІДКРИТТЯ клапана і 2) ЗАКРИТТЯ клапана.

2.11.2. Алгоритм управління

Регулятор ГВП підтримує температуру гарячої води в подавальному трубопроводі ГВП $T_{ГВП}$, задану налагоджувальним параметром $T_{завд}$.

Драйвер положення визначає положення клапана, при якому витрати теплоносія забезпечують рівність $T_{ГВП} = T_{завд}$. Це найбільш розповсюджений варіант алгоритму роботи регуляторів.

Двопозиційний драйвер рухає клапан від крайнього закритого до крайнього відкритого положення. Визначений час повністю відкритого положення в періоді регулювання забезпечує такі ж середні за період регулювання витрати теплоносія, як і у випадку драйвера положення.

Як регулюючий клапан можна використати нормально відкритий електромагнітний клапан. Клапан потрібно підключити до сигналу закриття регулятора, а на сухі контакти для кінцевих вимикачів встановити перемички.

Клапан регулятора ГВП повинен обов'язково закриватись до повного закриття потоку теплоносія, інакше не виключено перегрів теплоносія при малих витратах води. Проте, якщо електромоторний клапан має актуальність менше 100%, бажано встановлення кінцевих вимикачів для виключення неефективного ходу клапана за межею його актуальності.

Для визначення положення регулюючого клапана може бути використаний реохорд положення клапана. Напруга з реохорду в межах 0÷2,5 В підводиться до каналу аналогових вимірювань.

Регулювання визначеної температури теплоносія в подавальному трубопроводі системи виконує ПІД-регулятор опалення – програма розрахунків за класичною формулою

$$X = Kn \cdot (K1 \cdot \varepsilon + \frac{1}{t_{int}} \int_0^t \varepsilon \cdot dt + t_{diff} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}) = \int_0^t D \cdot dt = \int_0^t (n + i + d) \cdot dt,$$

де $\varepsilon = T_{завд} - T_{ГВП}$.

Коефіцієнт при пропорційній складовій $K1$ ($K1=1$ або $K1=0$) введений, щоб дати наладчику можливість тимчасово виключити пропорційну складову під час наладки. Для тимчасового відключення розрахунків інтегральної складової можна встановити $t_{int} = 0$. Для тимчасового відключення розрахунків диференційної складової можна встановити $t_{diff} = 0$.

Величини складових n , i , d , $D = n + i + d$ та X виводяться на індикацію РКІ в розділі меню регулятора. При драйвері положення X, c розраховується лише, коли $D < \min t_{пyx}$. Коли $X \geq \min t_{пyx}$, видається команда управління регулюючим клапаном на

час X . При двопозиційному драйвері $X, \%$ розраховується постійно і визначає коефіцієнт заповнення широтно-імпульсної послідовності відкриття-закриття регулюючого клапана.

Для драйвера положення розрахунки виконуються за поточною температурою $T_{1ГВП}$, яка повільно і відносно мало змінюється за період регулювання. При двопозиційному регулюванні безпосередньо за бойлером температура може змінюватись досить суттєво і розрахунки ведуться за середньою температурою в періоді регулювання. Температура води у користувача при цьому змінюється значно менше через ефект накопичення тепла у трубопроводах.

Режим роботи регулятора ГВП змінюється із включенням та відключенням опалення. Якщо опалення відключене, не діє і перший ступінь бойлера ГВП. Вода нагрівається до температури $55 \div 65^\circ\text{C}$ від температури ХВП $8 \div 15^\circ\text{C}$ приблизно на 40° . Якщо опалення включене, вода нагрівається в першому ступені бойлера ГВП майже до температури $T_{2оп} = 35 \div 45^\circ\text{C}$ і лише додатково прогрівається приблизно на 10°C . Урахування сезону роботи виконується встановленням налагоджувального параметра «Сезон» у розділі меню «Регулятор_ГВП». При цьому використовуються різні відповідні величини коефіцієнта пропорційності K_n .

2.13. Математична модель системи ГВП

Блочна схема математичної моделі наведена на рис. 3.

Формула для витрат регулюючого клапана виведена за аналогією формули витрат води через обмежувальну шайбу: $q = \frac{D^2}{21,5^2} \cdot \sqrt{H}$. Постійний коефіцієнт для клапана позначений $K_{ргвп}$, «діаметр» пропорційний радіусу, а замість квадратного кореня напору – різниця $q_{max} - q_{ргвп}$. Тобто, за цією аналогією $q_{ргвп} = K_{ргвп} \cdot x^2 \cdot (q_{max} - q_{ргвп})$, звідки і впливає наведена формула.

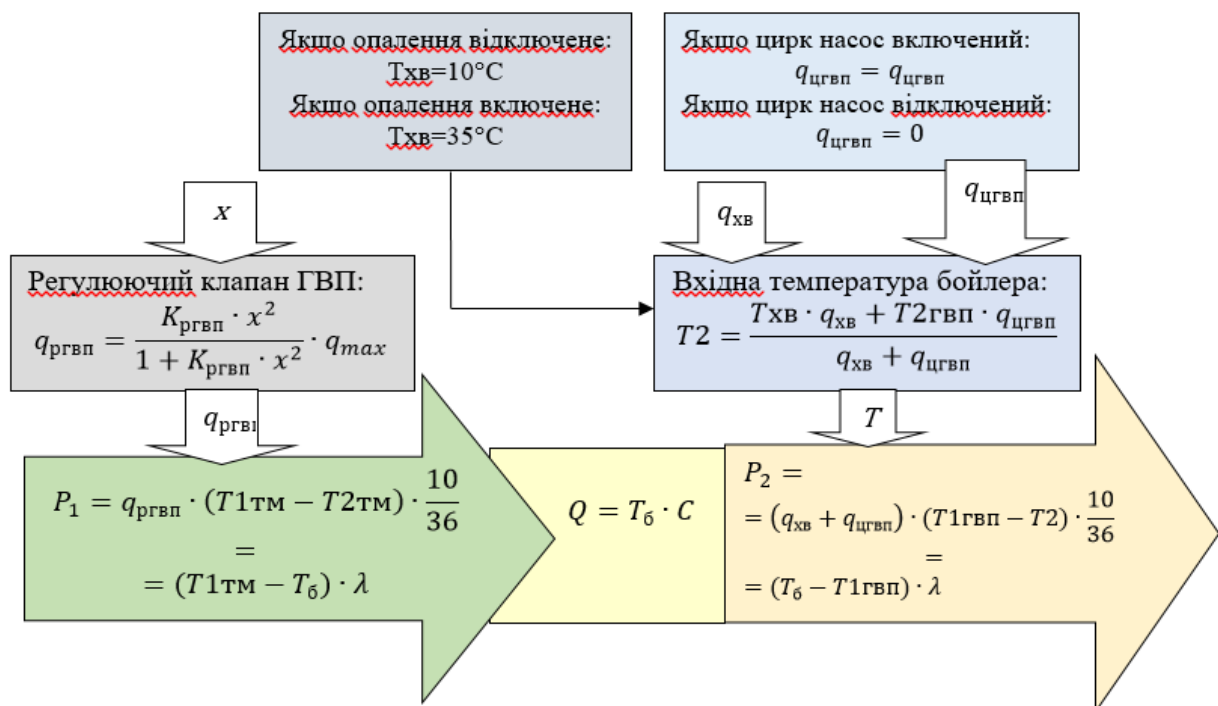


Рисунок 3 – Блочна схема математичної моделі системи ГВП

На рис. 4 наведений графік витрат клапана в залежності від відкриття клапана, x , мм.

Графік демонструє відомий факт, що при відсутності регулятора перепаду тиску на ділянці «клапан ГВП + бойлер ГВП», клапан ГВП стає нелінійним регулюючим органом.

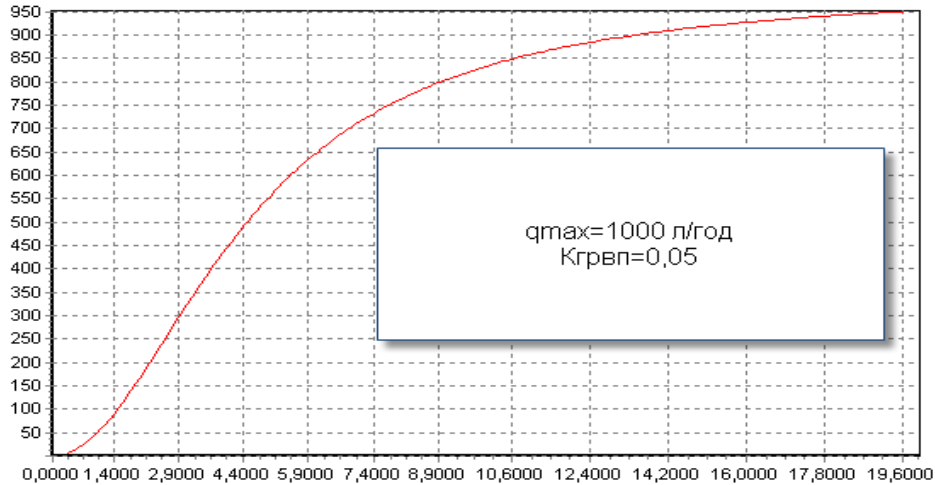


Рисунок 4 – Графік зміни витрат клапана ГВП (л/год) у залежності від зміщення клапана від повністю закритого положення, x , мм

Вхідна температура бойлера ГВП (T_2) є результатом змішування води із зворотного трубопроводу ГВП, яка надходить завдяки роботі циркуляційного насоса ГВП, з витратами $q_{цвп}$ та холодної води з міської водопровідної мережі $q_{хв}$. Витрати циркуляційного насоса вважаємо постійною величиною – налагоджувальним параметром моделі. Витрати холодної води є змінною, яку оператор може довільно визначати в інтервалі $0 \div q_{хв_max}$.

Теплова потужність P , кал/с, що надходить в бойлер ГВП, може бути розрахована за витратами теплоносія в первинному контурі, визначеними клапаном ГВП і різницею температур теплоносія на вході та виході бойлера, або за формулою теплопередачі від теплоносія до конструкції бойлера.

Вихідна теплова потужність бойлера ГВП може бути розрахована або за витратами води і температурами води на вході і виході вторинного контуру, або за формулою теплопередачі від конструкції бойлера до води в системі ГВП.

Конструкція (маса матеріалу) бойлера є накопичувальною теплоємністю C . Процес накопичення тепла в ній описується інтегруванням вхідної та вихідної потужностей:

$$Q = \int_0^t (P_1 - P_2) \cdot dt = T_{\sigma} \cdot C.$$

В ітераційному (покроковому) процесі обчислень температура конструкції бойлера на i -й ітерації:

$$T_{\sigma i} = T_{\sigma i-1} + (P_1 - P_2) \cdot \frac{\Pi_{\text{мод}}}{c \cdot 1000},$$

де $\Pi_{\text{мод}}$ – період моделювання, мс.

Із співвідношень вхідної потужності P_1 (рис. 3) вихідна температура первинного контуру бойлера:

$$T_{2TM_i} = T_{1TM} - (T_{1TM} - T_{\delta i}) \cdot \frac{\lambda \cdot 36}{q_{\text{ГВП}} \cdot 10}.$$

Із співвідношень вихідної потужності P_2 (рис. 3) вихідна температура вторинного контуру бойлера:

$$T_{1\text{ГВП}_i} = \frac{(q_{\text{ХВ}} + q_{\text{ЦГВП}}) \cdot \frac{10}{36} \cdot T_2 + T_{\delta i} \cdot \lambda}{(q_{\text{ХВ}} + q_{\text{ЦГВП}}) \cdot \frac{10}{36} + \lambda}.$$

Комп'ютерна модель періодично виконує розрахунки за сигналом від таймера. Період розрахунків постійний (100÷500 мс).

2.13.1. Урахування зміни $T_{2\text{ГВП}}$ після першого включення системи

Для того, щоб урахувати прогрів системи ГВП після її включення, будемо вважати, що температура впродовж трубопроводу циркуляції ГВП розподіляється рівномірно.

На рис. 5 наведено графік розподілу температури на довжині трубопроводу.

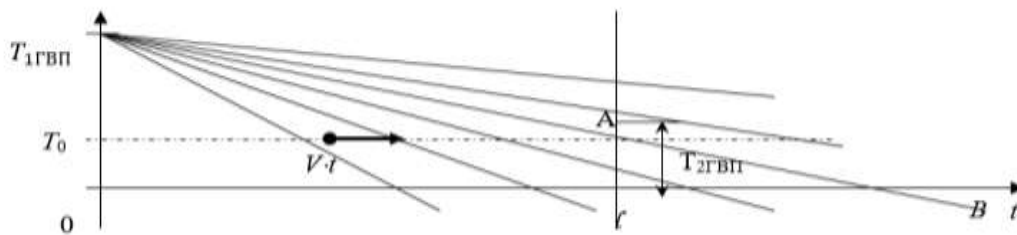


Рисунок 5 – Моделювання зміни $T_{2\text{ГВП}}$

Температура лінійно знижується від значення $T_{1\text{ГВП}}$ до температури уявної точки з $T = 0^\circ\text{C}$, яка внаслідок прокачки води циркуляційним насосом рухається зі швидкістю V . За час прокачки води, $t_{\text{прокачки}}$ (який можна визначити експериментально, замірявши час від включення циркуляції до моменту початку зростання $T_{2\text{ГВП}}$) ця точка досягне довжини трубопроводу l .

З розгляду геометричних співвідношень (рис. 5) (подібність $\Delta(0 - T_{1\text{ГВП}} - B) \sim \Delta(l - A - B)$) знаходимо

$$T_{2\text{ГВП}} = T_{1\text{ГВП}} - \frac{l \cdot T_{1\text{ГВП}}}{V \cdot t} + T_0 = T_{1\text{ГВП}} - \frac{t_{\text{прокачки}}}{t} \cdot T_{1\text{ГВП}} + T_0.$$

Вважаємо діапазон зміни $T_{2\text{ГВП}}$:

$$T_0 < T_{2\text{ГВП}} \leq (0,85 \div 0,95) \cdot T_{1\text{ГВП}}.$$

Алгоритм розрахунків може бути таким:

1) якщо $t < t_{\text{прокачки}}$, $T_{2\text{ГВП}} = T_0$;

$$2) \text{ інакше } T_{2\text{ГВП}} = T_{1\text{ГВП}} - \frac{t_{\text{прокачки}}}{t} \cdot T_{1\text{ГВП}} ;$$

$$3) \text{ але якщо } T_{2\text{ГВП}} \geq (0,85 \div 0,95) \cdot T_{1\text{ГВП}}, \text{ то } T_{2\text{ГВП}} = (0,85 \div 0,95) \cdot T_{1\text{ГВП}} .$$

Для відпрацювання алгоритмів регулювання ГВП було створено лабораторний полігон. Лабораторний полігон може працювати у двох режимах роботи:

- 1) моделювання процесу регулювання при взаємодії з реальним контролером ШУ ГВП в реальному часі;
- 2) моделювання процесу регулювання при взаємодії з емулятором регулятора ГВП ПК.

2.13.2. Емулятор регулятора ГВП у ПК

Блочна схема емулятора регулятора ГВП в ПК наведена на рис. 6.

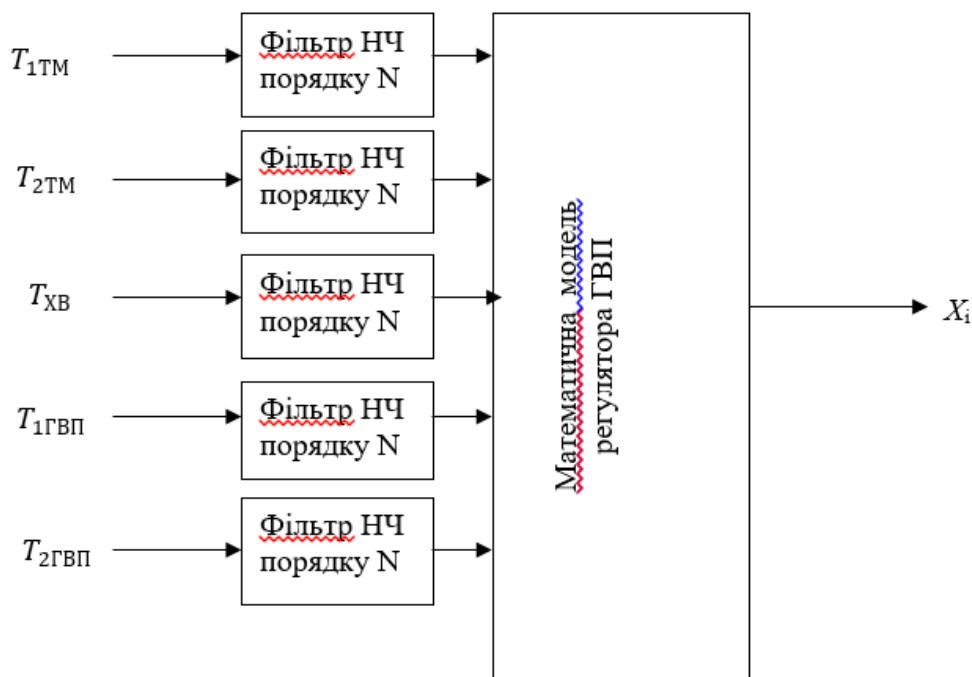


Рисунок 6 – Блочна схема емулятора регулятора ГВП у ПК

Усі температури проходять через фільтри низької частоти (НЧ) 2÷3 порядку з метою урахування затримки сигналів у фільтрах аналогових вимірювань.

Кожний можливий ланцюг фільтра програмується за класичною формулою моделювання інерційного ланцюга 1-го порядку. Важливим моментом моделювання є врахування роботи кінцевих вимикачів приводу клапана.

Якщо алгоритм регулятора ГВП видає зміщення клапана x , воно обмежується інтервалом

$$0 \leq x \leq x_{\max} .$$

Алгоритм регулятора ГВП видає час руху клапана

$$x_i = x_{i-1} \pm t_{\text{руху}} \cdot V ,$$

$$0 \leq x \leq x_{\max} .$$

де V – швидкість руху механізму клапана, мм/с.

2.13.3. Одиниці вимірювань у формулах моделювання

Таблиця 1 – Одиниці вимірювання в формулах моделювання

№ п/п	Величина	Позначення	Одиниці вимірювання
1	Температура	T_{xxx}	°C
2	Теплова потужність	P_1, P_2	кал/с
3	Теплова енергія	Q	кал
3	Коефіцієнт теплопередачі	λ	кал/(с·°C)
4	Теплоємність конструкції бойлера	C	кал/°C
5	Витрати теплоносія або води	q_{xxx}	л/год
6	Зміщення клапана від стану повної відсічки	x	мм
7	Час руху клапана	$t_{руху}$	с
8	Швидкість руху клапана	V	мм/с
9	Період моделювання	$\Pi_{мод}$	мс

2.13.4. Реалізація ПД-регулятора

Формула ПД-регулятора (див. п. 2.11.2):

$$X = Kn \cdot \left(K1 \cdot \varepsilon + \frac{1}{t_{инт}} \int_0^t \varepsilon \cdot dt + t_{оуф} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \right) = \int_0^t D \cdot dt = \int_0^t (n + i + d) \cdot dt,$$

де $\varepsilon = T_{завд} - T_{ф}$.

Для розрахунків на мікро-ЕОМ потрібна дискретна модель. Мікропроцесор виконує розрахунки час від часу з періодом регулювання $\Pi_{пер}$ – це період часу між відліками. В дискретній моделі dt замінюється $\Pi_{пер}$, $d\varepsilon = \Delta\varepsilon = \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1} = T_{ф-j-1} - T_{ф-j}$. Замість інтеграла буде дискретна сума.

Для реалізації алгоритму необхідно знайти приріст регульованої величини на поточному кроці регулювання. Величина приросту регульованої величини буде часом включення приводу електромоторного клапана. А регульована величина – зміщення клапана отримується як результат інтегруючої властивості електромоторного приводу.

Такі розрахунки мають місце при реалізації регуляторів температури – регуляторів ГВП і регуляторів опалення.

Для регуляторів тиску необхідно обчислювати не приріст, а саму регульовану величину – частоту живлення електродвигуна насоса:

$$F_{упр} = Kn \cdot \left[K1 \cdot (P_{завд} - P) + \frac{1}{t_{инт}} \int_0^t d(P_{завд} - P) + t_{оуф} \cdot \frac{d(P_{завд} - P)}{dt} \right],$$

де $P_{завд}$ – завдання регулятора тиску, P – фактично вимірний тиск, Kn – коефіцієнт пропорційності (або підсилення), $K1$ – штучно введений коефіцієнт для відключення пропорційної складової під час наладки ($K1=1$ – пропорційна складова включена, $K1=0$ – про-

порційна складова відключена), t_{int} – постійна часу інтегрування, t_{diff} – постійна часу диференціювання.

Після переходу від неперервних до дискретних змінних одержимо формули, які і використовуються у програмній реалізації.

Період регулювання P_{reg} недоцільно робити надто малим. Якщо він надто малий, формули будуть працювати з шумами вимірювань. Тобто, необхідно, щоб виявлені зміни регульованої величини перевищували шуми вимірювань.

Програмна реалізація у відповідності з наведеною вище моделлю була реалізована та перевірена при роботі МРТП-7 у складі ШУ автоматики в комунальній сфері.

3. Висновки

Розроблені апаратні та програмні рішення дозволили створити та запровадити ряд ШУ. Всі створені ШУ можуть бути об'єднані в технологічну локальну мережу зв'язку, що дає можливість обміну технологічної інформації між ШУ і позбавляє необхідності дублювання датчиків інформації. Найчастіше це датчик температури зовнішнього повітря, дані якого розповсюджуються через ТЛМ усім ШУ з регуляторами опалення, датчики температури в подавальному і зворотному трубопроводах тепломережі, датчик температури холодної води, дискретні сигнали датчиків заливки приміщення бойлерної та наявності тиску в системі ХВП.

Для забезпечення живучості обладнання датчики, дані яких розповсюджуються ТЛМ, підключаються до ШУ з найбільшою зоною обслуговування або до ШУ, для роботи якої сигнал є найбільш критичним. Наявність мережі ТЛМ дозволяє організувати систему сигналізації про стан обладнання об'єкта і передачу сигналів у диспетчерську систему.

Уніфікація технологічної інформації дозволяє інтегрувати все обладнання, яким керують створені ШУ, побудинково в локальну диспетчерську систему і потім поквартально в систему «Розумне місто».

Проведені експериментальні дослідження та створені фізико-математичні моделі дозволили оптимізувати алгоритми управління обладнанням у комунальній сфері та втілити їх у програмне забезпечення контролерів, які входять у склад ШУ, запроваджених у системах автоматизації на новобудовах м. Києва.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г. та ін. Енергозберігаючі засоби автоматизації і світлодіодні системи освітлення в промисловості, на транспорті, в будівництві та комунальній сфері. *Наука та інновації*. 2013. № 5. С. 19–26.
2. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Основні положення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=45881.
3. ДСТУ 4472–2005. Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Загальні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59375.
4. СНіП 2.04.05-91. Опалення, вентиляція і кондиціонування. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=22092.

Стаття надійшла до редакції 04.04.2022