

УДК 681.5.015.8

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771402020248748>

І. М. Голінко¹, *к.т.н., доцент*, **П. В. Гікало**², *старший викладач*

МЕТОДОЛОГІЯ ПРИСКОРЕНОЇ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ

En

The specificity of accelerated software development for microcontrollers is considered. The software development technique for a program-logic controller is presented on the example of an algorithm for controlling the industrial premises microclimate. The method of “dew point” for the control system of industrial air conditioning. The analysis of the functioning of the control system of industrial air

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

conditioning according to the “dew point” method has been carried out and a block diagram of the control system of an artificial microclimate has been proposed. Structurally, the mathematical description of an artificial microclimate system is presented, which takes into account the nonlinearity of mass-exchange processes of air preparation. It can be used by specialists to implement computer-integrated technologies and to analyze and adjust the parameters of the control system of industrial air conditioners.

Ru

Рассматривается специфика ускоренной разработки программного обеспечения для микроконтроллеров. Приведена методика разработки программного обеспечения для программно-логического контроллера на примере алгоритма управления микроклиматом промышленных помещений. Рассмотрен метод «точки росы» для системы управления промышленным кондиционером. Проведен анализ функционирования системы управления промышленным кондиционером по методу «точки росы» и предложена структурная схема системы управления искусственным микроклиматом. Структурно представлено математическое описание системы искусственного микроклимата, где учтены нелинейность массообменных процессов подготовки воздуха. Может использоваться специалистами для внедрения компьютерно-интегрированных технологий и для анализа и настройки параметров системы управления промышленных кондиционеров.

Вступ

Бурхливий розвиток нанотехнологій електронних компонентів вплинув не тільки на техніку контролю та керування, але й змінив підхід до проектування автоматичних систем керування (АСК) технологічними процесами (ТП). У системотехніка з'явилась високоінтегрована елементна база у вигляді сигнальних мікропроцесорів (СМП), які є спеціалізованими мікроЕОМ. Вартість базових СМП у поодиноких випадках перевищує одиниці доларів, що стимулює виробництво програмованих логічних контролерів (ПЛК) на базі СМП та на сьогоднішній день переросло у новий напрям пристроїв промислового інтернету речей (ІоТ).

Не зважаючи на значні досягнення у галузі автоматизації проектування, розробка мікропроцесорних систем керування носить творчий характер, що не виключає наявності неточностей у проектах. Проектування ПЛК проходить багато ітераційних етапів, серед яких слід відзначити реалізацію апаратної схемотехніки та програмного забезпечення (ПЗ) пристрою. Особливо важливий етап – розробка ПЗ, яке поділяється на апаратне (підтримка схемотехнічних рішень ПЛК) та функціональне (реалізація алгоритму керування для технологічної системи). Неточності ПЗ можуть суттєво вплинути на кінцевий результат проектування. Від обраної методики та якості перевірки системного та прикладного ПЗ ПЛК залежить якість функціонування системи.

Програмно-апаратним комплексам відлагоджування мікропроцесорних систем присвячено багато публікацій [1, 2]. Розробники пропонують

різноманітні симулятори та відлагоджувальні пристрої. Серед таких пристроїв слід виділити *j-link* фірми *Segger*, *st-link/v2* фірми *STMicroelectronics*, *STK200/300* та *STK500* фірми *Atmel* тощо. Основне завдання наборів розробника даної спрямованості – програмування СМП та відлагодження ПЗ, що забезпечує коректну обробку сигналів мікроконтролером. Проте пакети даної парадигми мають суттєвий недолік – складність моделювання поведінки СМП у рамках роботи технологічної системи, що має свої особливості, які важко врахувати при тестуванні ПЛК, який не підключений до ТП. *SoftLogic* і *SCADA*-системи *CoDeSyS*, *ISaGRAF*, *UltraLogic*, *Trace Mode*, *InSat* та інші надають можливість моделювати фізичні процеси за допомогою математичних систем, наприклад *MatLAB*-ом і за допомогою *OPC/DDE* інтерфейсу здійснювати обмін даними із середовищем програмування. Проте такі програмні пакети функціонують у середовищі *Windows* та їх застосування на СМП неможливе.

Постановка завдання

Проведений літературний аналіз не виявив середовищ програмування СМП, які б поєднували переваги розглянутих напрямків. На думку авторів, перспективним напрямком досліджень є розробка середовища програмування ПЛК, що реалізує алгоритм керування ТП із можливістю моделювання ТП у імітаційному режимі. Метою публікації є розробка етапів методології прискореної розробки ПЗ для ПЛК та реалізація ПЗ на основі запропонованої методології.

Методологія прискореної розробки ПЗ на прикладі системи керування мікрокліматом

При розробці програмно-технічних комплексів керування ТП значний відсоток часу виділяється на налагоджувальні роботи. До основних налагоджувальних завдань системи керування відносяться: налагодження логічних алгоритмів керування обладнанням ТП; налаштування параметрів регуляторів для стабілізації змінних ТП; інтегрування розробленої системи керування у діючу систему управління виробництвом. Враховуючи, що вищезгадані завдання виконуються висококваліфікованими спеціалістами із відрядженнями, собівартість таких робіт висока. Для зменшення собівартості налагоджувальних робіт у середовищі програмування ПЛК достатньо передбачити імітаційну модель ТП, що дозволить проводити тестування розробленого алгоритму керування в режимі моделювання. Такий підхід зменшує час на програмування алгоритму керування ТП та налагоджувальні роботи із відрядженнями.

Методологія прискореної розробки ПЗ для ПЛК складається із наступних етапів.

1. Виходячи з галузі застосування ПЛК визначається перелік необхідних функціональних операцій (логічні, арифметичні, таймерні функції; функції типових залежностей; типових законів регулювання; функцій вводу/виводу тощо).
2. Для кожної функції формалізується мнемокоманда операції: вхідні параметри; вхідні змінні; вихідні змінні.
3. Кожна функція (мнемокоманда) формалізується у вигляді підпрограми на асемблері СМП. Підпрограми компілюються у машинний код СМП і створюється бібліотека, із якою буде функціонувати ПЛК.
4. Розробляється та компілюється *RunTime*-система для СМП, яка класифікується як системне ПЗ ПЛК. *RunTime*-система представляє собою інтерпретатор мнемокоманд, що відпрацьовує підпрограми алгоритму керування.
5. Проводиться відлагодження та перевірка функціонування *RunTime*-системи СМП із використанням програмно-апаратних комплексів відлагодження.
6. Для ПЕОМ розробляється *SoftLogic*-система (середовище програмування ПЛК та симуляції, іншими словами це компілятор мнемокоманд). *SoftLogic*-система класифікується як прикладне ПЗ персонального комп'ютера та базується на використанні мов програмування ПЛК за стандартом МЕК 61131-3.
7. Проводиться комплексна перевірка ПЗ *SoftLogic*- та *RunTime*-систем.

Такий підхід дозволяє використовувати універсальне середовище програмування та симуляції для різних типів СМП. Звичайно, для кожного типу СМП необхідно розробити свою *RunTime*-систему.

Розглянуті етапи методології розробки ПЗ реалізовано для ПЛК «КонтрАС-500» [3]. У статті автори діляться досвідом синтезу АСК для системи штучного мікроклімату (СШМ). Для програмування ПЛК розроблено пакет прикладного ПЗ [4], який одночасно є моделюючим комплексом та програматором СМП *RISC*-архітектури фірми *Atmel*. У пакеті реалізовано мову структурних схем, де розроблений алгоритм керування транслюється у відповідний набір мнемокоманд. Мнемокод через *SOM*-порт програмується у *Flash*-пам'ять СМП. Далі, *RunTime*-система ПЛК інтерпретує за-програмований мнемокод, тим самим відпрацьовуючи алгоритм керування.

Основне завдання, що постало перед авторами – розробка функціональних зв'язків між вхідними та вихідними портами ПЛК для реалізації алгоритму керування мікрокліматом промислового приміщення, використовуючи метод «точки роси». Проведений літературний огляд [5] стосовно керування СШМ показав, що у межах АСК відомі різноманітні функціональні рішення контурів керування, у залежності від типу та кількісного складу технологічного обладнання кондиціонера. Для синтезу алгоритмічних зв'язків системи керування проведено аналіз процесу штучного мікро-

клімату як об'єкта керування із використанням $h-d$ діаграми, яку зображено на рис. 1.

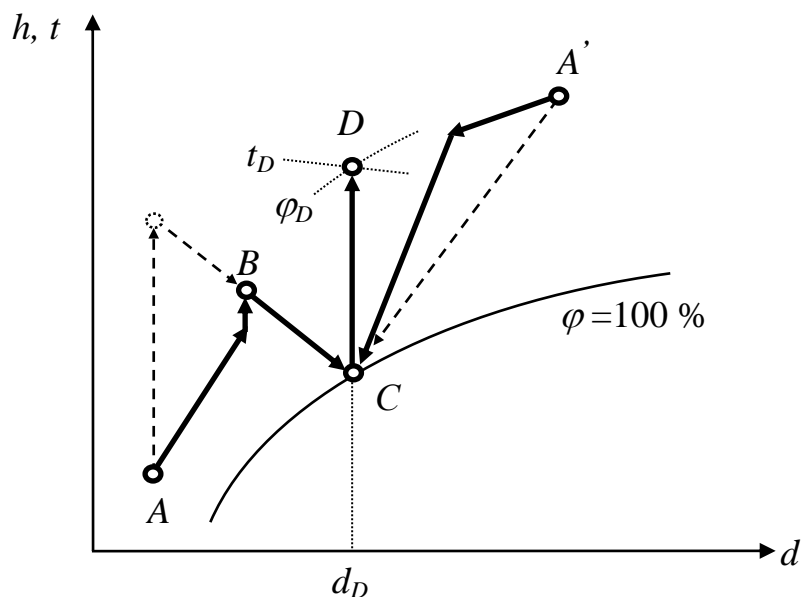


Рис. 1. $H-d$ діаграма процесу керування СШМ

Відповідно до методу «точки роси» спочатку досягається температура «точки роси» (точка C). Далі повітря нагрівається до заданої температури приміщення (точка D). На рисунку пунктирними лініями показано процес кондиціонування без рециркуляції повітря, а суцільною – з рециркуляцією 50 %. Метод «точки роси» реалізується за допомогою функціональної схеми автоматизації, яка зображена на рис. 2.

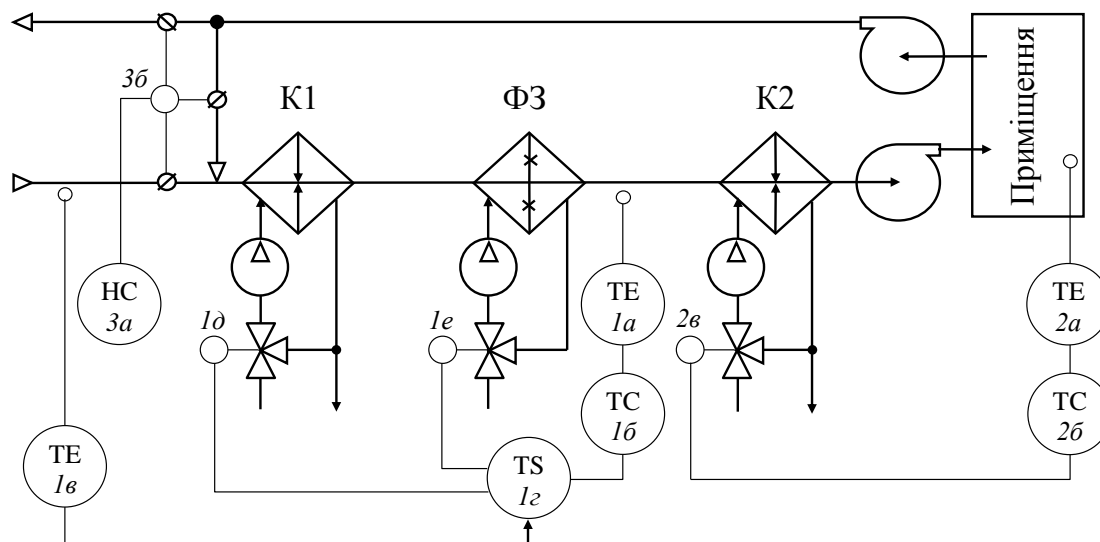


Рис. 2. Спрощена функціональна схема автоматизації обладнання промислового кондиціонера за методом «точки роси»

У холодну пору року регулятор (поз. 1 б) впливає на регулюючий клапан (поз. 1 д) калорифера $K1$ таким чином, щоб повітря нагрілося до температури, що характеризується точкою B (рис. 1). У зрешувальній ка-

мері повітря адіабатично охолоджується та зволожується (пряма BC) до температури «точки роси». У теплу пору року температура «точки роси» підтримується регулятором (поз. 1 б), який впливає на клапан (поз. 1 е) для зміни витрати холодної води у зрошувальній камері ФЗ. На цьому етапі проходить процес політропного охолодження та насичення повітря вологою (процес $A'C$). Таким чином, незалежно від початкових значень параметрів повітря навколишнього середовища, після зрошувача повітря має однакові параметри, що характеризуються точкою C . У подальшому, повітря, що надходить у приміщення, нагрівається до заданого значення калорифером $K2$ за допомогою контуру регулювання (поз. 2 а – 2 в). Ступінь рециркуляції визначається оператором за допомогою панелі дистанційного керування (поз. 3 а). Перемикання між зимовим та літнім режимами роботи кондиціонера відбувається за допомогою комутатора (поз. 1 з).

Перевірка працездатності алгоритму керування здійснювалась за допомогою аналітичних методів моделювання. Враховуючи структурну і функціональну складність СШМ, математичне моделювання тепло- та масообмінних процесів здійснювалося у вигляді функціональних блоків, де виходи одного блоку є входами іншого. Динамічну модель СШМ декомпоновано на блоки калориферів 1-го та 2-го підігріву, зрошувача, приміщення, змішування навколишнього та рециркуляційного повітря, ПД-регуляторів температури.

Динамічні моделі тепло- та масообмінних процесів обладнання та приміщення структурно ідентичні та зображені на рис. 3, відрізняються лише коефіцієнти передаточних функцій $W_1(p) \dots W_5(p)$. Динаміка температурного режиму апаратів та приміщення моделювалися із використанням передаточних функцій. Масообмінні процеси моделювалися із застосуванням $h-d$ діаграми, що дозволило враховувати нелінійність масообміну за незначних похибок динамічного моделювання (2 – 5 %). Модель блоку змішування навколишнього повітря та повітря рециркуляції розраховує температуру і вологість пропорційно ступеню рециркуляції (0 ... 100 %). Функціональні блоки ПД-регуляторів температури реалізують алгоритм ПД-регулювання.

Моделювання СШМ із використанням розглянутих функціональних блоків проводилось за допомогою прикладного ПЗ [4]. Структурна схема СШМ, що моделювалася представлена на рис. 4. Дослідження розробленої АСК показали, що система керування кондиціонером добре відпрацьовує температурні збурення та збурення вологості повітря навколишнього середовища у різні пори року. Числові значення параметрів моделі СШМ взято із технічного каталогу обладнання кондиціонерів фірми *VTS CLIMA* [6] та статей математичних моделей кліматичного обладнання [7 – 9]. Синтез параметрів ПД-регуляторів проводився за інженерними методиками налагодження АСК [10].

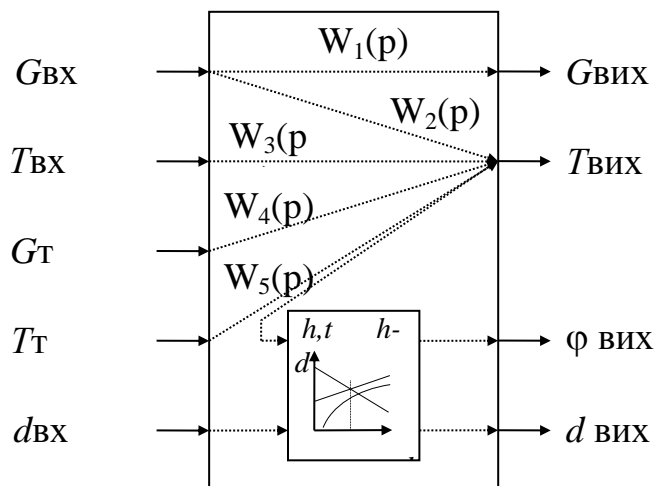


Рис. 3. Структурна схема функціональних блоків для калориферів, зрошувача та приміщення. $W_1=1$ – канал витрати повітря; W_2 – канал впливу витрати на температуру повітря; W_3 – канал впливу температури повітря входу на вихід; W_4 – канал впливу витрати теплоносія на температуру повітря; W_5 – канал впливу температури теплоносія на температуру повітря

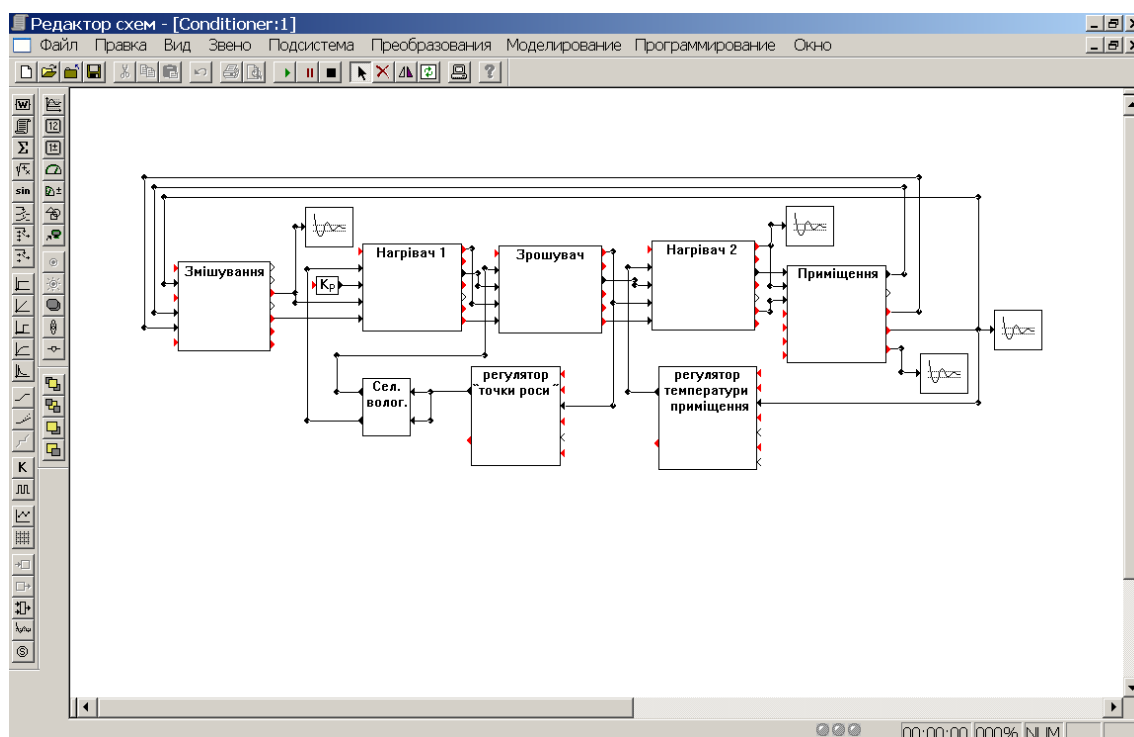


Рис. 4. Структурна схема СШМ, що моделювалася

Таким чином, було перевірено працездатність алгоритму керування промисловим кондиціонером за методом «точки роси». Розглянута модель СШМ дозволила «оцінити субоптимальні» параметри налаштувань ПД-регуляторів із врахуванням нелінійності масообміну. Отриманий алгоритм керування промисловим кондиціонером доповнено підсистемами логічно-

го керування вентиляторами, сигналізації та блокування (для захисту обладнання промислового кондиціонера у зимову пору року), протоколом *ModBus* для обміну інформацією по інтерфейсу *RS-485* із *SCADA*-системою верхнього рівня та трансливали у ПЛК. Проведений аналіз дав змогу виявити та усунути неточності та помилки алгоритмізації ПЛК на стадії проектування АСК, що дозволило уникнути додаткових витрат при розробці алгоритму керування для ПЛК «КонтрАС-500» та виконанні пусконаладжувальних робіт.

Особливості реалізації мікроклімату у пасажирських літаках

Характеристики повітря у салонах пасажирських літаків схожі з параметрами мікроклімату повітря промислових та офісних приміщень. Проте, салони літаків відрізняються від промислових приміщень у багатьох відношеннях, зокрема геометрією простору, необхідністю герметизації салону та рядом інших факторів.

Якісні характеристики повітря у літаках визначаються: тиском; вмістом кисню; температурою; вологістю; концентрацією забруднюючих речовин у повітрі. Перелічені характеристики забезпечуються автономною СШМ літака, на яку подається повітря від двигунів літака. На невеликих висотах польоту відбір повітря від двигунів проводиться від ступені з малим тиском і температурою повітря. Кількість повітря, що подається на СШМ, залежить від режиму роботи двигунів, тому тут використовуються регулятори стабілізації масової витрати повітря.

Отримавши від двигунів повітря в необхідних кількостях, що відбирається зазвичай від останньої ступені, СШМ отримує його із температурою і тиском, які на сучасних літаках досягають 20 МПа і 527 °С. Ці параметри залежать від режиму польоту (зліт, номінальний і малий форсаж), висоти польоту і швидкості. У польоті тиск повітря змінюється від 1,5 ... 2 МПа до 0,2 ... 0,3 МПа, тому на вході СШМ встановлюються регулятори надлишкового тиску. Температура повітря також змінюється в широких межах від 77 °С до 527 °С, тому в СШМ температура знижується в блоках первинного і основного охолодження. На рис. 5 зображено узагальнену схему СШМ сучасних пасажирських літаків.

Вміст кисню у салоні літака забезпечується забором свіжого повітря через повітряний забірник. У залежності від типу пасажирського лайнера кожен хвилину генерується 400...600 літрів повітря на пасажира, що більше необхідного для людини у стані спокою. Повітря у салоні постійно циркулює за допомогою системи повітроводів. Рециркуляційне повітря проходить очистку на *HEPA*-фільтрах, що мінімізує концентрацію мікрочастинок у повітрі. Рециркуляційне повітря змішується у пропорції 1:1 зі свіжим, що надходить у розподільний колектор. Інша частина відпрацьованого повітря видаляється із літака через випускні клапани.

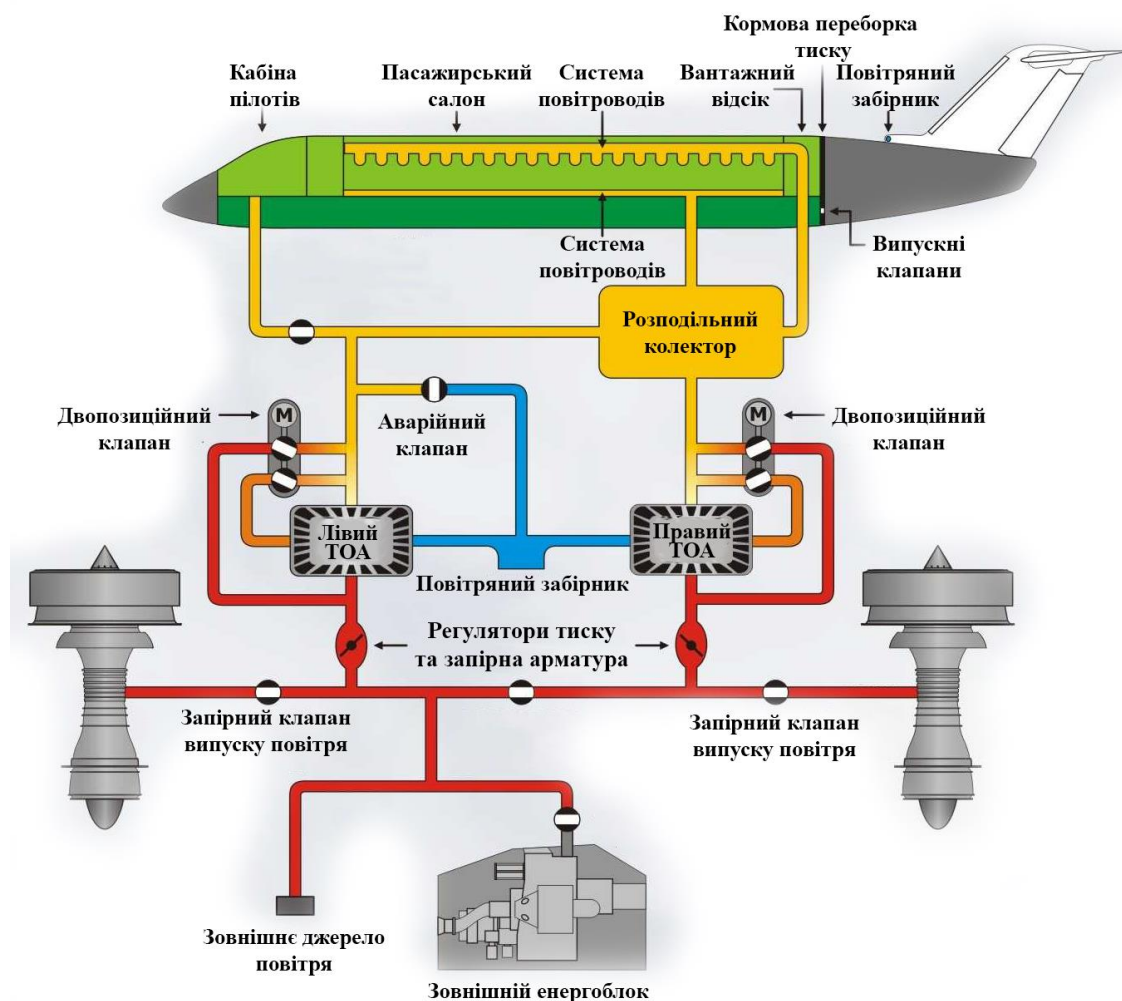


Рис. 5. Технологічна схема СШМ пасажирського літака

Температурний режим повітря, що надходить на розподільний колектор регулюється на двох повітряних теплообмінних агрегатах (ТОА), які забезпечують режим резервування СШМ літака. Температура у салоні регулюється в межах $20 \dots 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Відносна вологість у пасажирському салоні низька і змінюється в межах $15 \dots 25 \%$, що зменшує поширення бактерій повітряним шляхом. Під час перельоту пасажиром видають освіжаючі салфетки. Вони потрібні, щоб зволжити шкіру обличчя та рук. Кабіна пілотів герметична із індивідуальним мікрокліматом. У кабіні пілотів є можливість стабілізувати відносну вологість у межах $20 \dots 60 \%$.

Салон пасажирського літака герметичний. У салоні стабілізується надлишковий тиск за рахунок регуляторів тиску, оскільки організм людини не адаптований до тиску атмосферного повітря на висоті польоту $9 \dots 11 \text{ км}$.

Усі елементи СШМ літака функціонують від енергії стисненого повітря, що відбирається від турбовентиляторних двигунів. У більшості СШМ стабілізація надлишкового тиску у салоні літаків та масової витрати

повітря виконані на пневматичних регуляторах прямої дії, оскільки таке рішення безпечно та не потребує додаткової енергії. Стабілізація температури у салоні пасажирських літаків виконується за допомогою електронних регуляторів. Тому, запропоновану методологію прискореної розробки ПЗ для СШМ можна застосовувати у контурах регулювання температури літальних апаратів.

Висновки

Запропонована методологія прискореної розробки ПЗ для ПЛК дає можливість у стислі строки розробити алгоритм керування технологічною системою та перевірити його працездатність у режимі імітаційного моделювання. Тому, запропонований підхід розглядає ПЛК як пристрій процесу керування у складі технологічної системи, тобто розглядається як комп'ютерно-інтегрована система. Отриманий досвід розробки ПЗ для керування мікрокліматом можна поширити на проектування систем керування мікрокліматом пасажирських літаків із врахуванням технологічних особливостей кліматичного обладнання літаків.

До переваг розглянутої методології розробки ПЗ слід віднести універсальність алгоритмів керування при переході на інший тип СМП. Скомпільований мнемокод залишається незмінним, необхідно тільки перекомпілювати *RunTime*-систему (інтерпретатор мнемокоманд) для нового типу СМП.

Список використаної літератури

1. *Редькин П. П.* 32/16 микроконтроллеры ARM7 семейства AN91SAM7 семейства Atmel. Руководство пользователя (+CD). / П.П. Редькин. –М.: Издательский дом “Додэка-XXI”, 2008. –704 с.: ил.
2. *Вольфганг Т.* Измерение, управление и регулирование с помощью AVR микроконтроллеров / Т. Вольфганг. –К.: “МК-Пресс”, 2007. –208 с.
3. *Гемба В. М.* Новий контролер автоматизованих систем. / В. М. Гемба // Енергозберігаючі технології та автоматизація №3, 2002. с. 37.
4. *Айзенберг Д. Е.* Разработка компьютерных моделей технологических систем. / Д. Е. Айзенберг, В. М. Гемба, И. М. Голинко // Енергозберігаючі технології та автоматизація №1, 2003. с. 42–44.
5. *Бондарь, Е. С.* Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. –К.: ООО “Издательский дом “Аванпост–Прим”, 2005. – 560 с.
6. Каталог. VENTUS – вентиляционные агрегаты и центральные кондиционеры. –М.: VTSGroup, 2003. –156 с.

7. *Голінко І. М.* Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2016. № 15, –С. 83–92.
8. *Golinko, I.* Time-variant model of heat-and-mass exchange for steam humidifier / I. Golinko, V. Drevetskiy // Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. –2020, № 2. pp. 24–27.
9. *Голінко, І. М.* Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2018. № 18, С. 30–38.
10. *Golinko, I. M.* Optimal Tuning of a Control System for a Second-Order Plant with Time Delay / I. M. Golinko // ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2014, Vol. 61, No. 7, pp. 524–532.