

УДК514.853

Д.М. Нелюба, М.М. Гонтар

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ, ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

У статті розробляється математична модель системи опалення, вентиляції та кондиціювання, як об'єкта керування, придатної для подальшого використання при розробці автоматичних систем регулювання. Отримана нелінійна модель являє собою багатозв'язну систему з 6 входами і 8 виходами і може бути розкладена на 5 підсистем, які також є нелінійними системами.

**Ключові слова:** математична модель, опалення, вентиляція, кондиціювання повітря, СОВКП, HVAC.

### Вступ

У країнах ЄС споживання енергії в будівлях становить близько 40% від загального споживання енергії, і зросло з 1974 більш ніж на 13% [1]. Споживання енергії сильно залежить від погодних умов. В залежності від географічного положення країни, більше половини цієї енергії може використовуватися для створення внутрішніх кліматичних умов. З технологічної точки зору, вважається, що застосування конкретних технологій, таких як Системи управління енергетикою приміщення (СУЕП, Building Energy Management Systems, BEMSs) може заощадити до 20% від споживання енергії в будівельному секторі, тобто 8% від загального споживання. СУЕБ, як правило, застосовується тільки для управління активними системами, тобто системами опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (СОВКП).

Дослідження, проведене в рамках проекту ALTENER [2] показав, що використання автоматичного управління для пасивних систем (наприклад, затінення або вільного охолодження) та її інтеграції в СУЕП може привести до значного зниження енергетичних втрат порівняно з затратами на управління

[3]. Таким чином, автоматичне управління має велике значення. Проте, системи управління в будівлях часто розробляються і налаштовуються за допомогою емпіричних правил, не завжди сумісних з вимогами до контрольованого обладнання, енергетичної ефективності та очікуваннями і попитом користувачів.

### Основна частина

Розроблення точної моделі системи вентиляції та кондиціювання, необхідне для синтезу та аналізу роботи регулятора. СОВКП є досить складною (рис. 1). Вона складається з двох основних частин: повітряної і водяної підсистем. Ці підсистеми сходяться в теплообміннику (нагрівачі), де теплова енергія передається від води до повітря. Водяна підсистема складається з котла, водяного насоса, триходового регулятора витрат, труб, а також водонагрівальної спіралі. Повітряна підсистема складається з входу зовнішнього повітря, входу зворотного повітря, повітропроводів, вентилятора, змішувальної камери (включаючи повітряні заслінки зовнішнього і зворотного повітря) і повітряної частини теплообмінника. Регулятори потоку повітря і клапан потоку води мають пневматичний привод, що вимагає використання електропневматичних перетворювачів.

Важливо правильно вибрати відповідну форму моделі системи. Модель системи складається, наскільки це можливо, з моделей окремих компонентів або логічних груп компонентів (модулів). Так як модель повинна використовуватись для розробки регулятора, надзвичайно важливо, щоб вона точно враховувала стаціонарні і

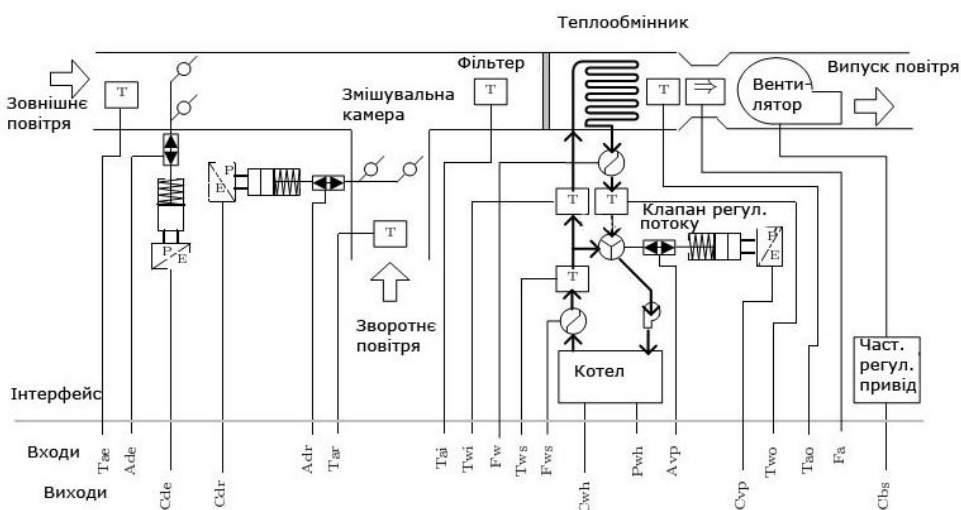


Рис. 1. Основні підсистеми функціональної моделі СОВКП

динамічні характеристики системи. Динаміка, пов'язана з датчиками, не змодельовувалась окремо, а була включена в динаміку системи в цілому. Враховуючи вищезазначене, модель розбита на п'ять підсистем (табл. 1).

Кожна модель підсистеми розроблена з використанням моделей її складових компонентів. Значна кількість змодельованих компонентів мають нелінійну стаціонарну поведінку. Ці нелінійні характеристики враховані в усіх змодельованих компонентах, за винятком теплообмінника. Моделювання динаміки теплообмінника є складною проблемою. Тому була розроблена його лінійна модель навколо робочої точки. В межах робочого діапазону введеного лінійною моделлю теплообмінника, динамічні характеристики компонентів точно представлені з використанням моделей першого порядку з транспортними затримками. Загальна модель СОВКП має шість входів (4 виходи регулятора і 2 входи збурень) та вісім виходів (виходи регулятора) (табл. 2, рис. 2).

Визначивши структуру моделі, виконана розробка моделей підсистеми.

Таблиця 1

Підсистеми з яких складається модель СОВКП

Підсистеми	Опис
Вентилятор	Відцентровий вентилятор зі змінною швидкістю обертання
Змішувальна камера	Повітряні заслінки зовнішнього і зворотного повітря і об'єм для змішування
Теплообмінник	Чотирихпрохідний спіральний
Клапан регулювання потоку	Тристоронній, рівнопропорційний, пневматичний клапан
Котел	Електричний водонагрівач з насосом з постійною подачею води

Таблиця 2

Входи і виходи експериментальної моделі СОВКП

Позн.	Призначення
<i>Входи</i>	
C <sub>vp</sub>	Завдання положення клапана
C <sub>bs</sub>	Завдання швидкості вентилятора
C <sub>dr</sub>	Завдання положення зворотної повітр. заслінки
C <sub>wh</sub>	Завдання споживаної потужності водонагрівача
T <sub>ar</sub>	Температура повітря, що повертається
T <sub>ae</sub>	Температура зовнішнього повітря
<i>Виходи</i>	
F <sub>w</sub>	Швидкість потоку води через теплообмінник
F <sub>ws</sub>	Швидкість потоку води через всю систему
F <sub>a</sub>	Швидкість зворотного повітря через систему
T <sub>wo</sub>	Температура води з теплообмінника
T <sub>ao</sub>	Температура повітря з теплообмінника
T <sub>ai</sub>	Температура повітря в теплообмінника
T <sub>wi</sub>	Температура води в теплообмінника
T <sub>ws</sub>	Температура води з котла

Подача повітря є перш за все функцією частоти обертання вентилятора, але також залежить від положення заслінки змішувальній камері. Таким чином вентилятор був змодельований як система 1x2, що має керований вхід швидкості вентилятора (C<sub>bs</sub>) і кероване положення заслінки зворотного повітря

(C<sub>dr</sub>) у якості входних величин і витрату повітря у якості вихідної величини. Модель вентилятора (рис. 3), містить 3 основні блоки: "c2Fa", "AdjFa2" і "Динаміка потоку". Вони моделюють зв'язок між керованою швидкістю вентилятора та подачею повітря, вплив заслінки на потік повітря і динаміку, зв'язану зі зміною потоку повітря, відповідно.

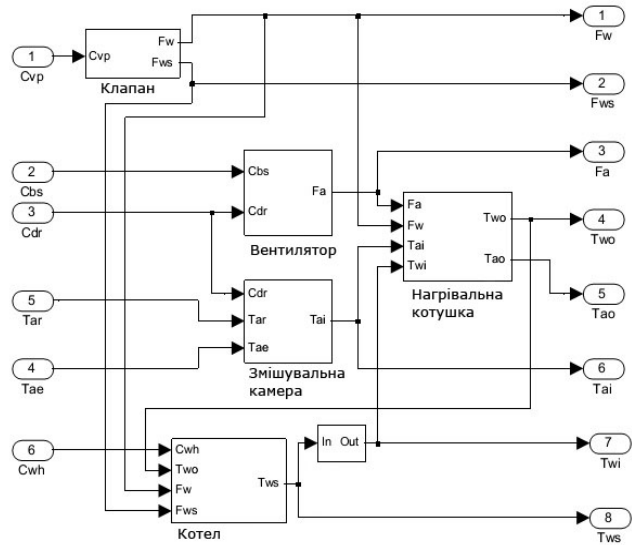


Рис. 2. Повна модель системи вентиляції та кондиціювання

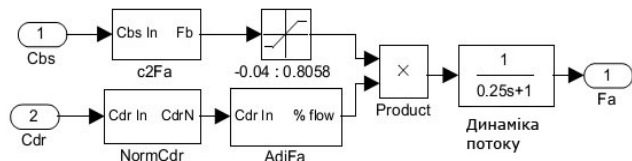


Рис. 3. Модель вентилятора

**Математична модель вентилятора.** Вентилятор являється основним компонентом у системі змінного об'єму повітря. Привід змінної частоти дозволяє змінювати швидкість вентилятора, змінюючи при цьому швидкість потоку повітря через систему. Зв'язок між керованою швидкістю вентилятора та потоком повітря не є лінійною функцією, тому що ефективність центробіжного вентилятора зменшується зі збільшенням швидкості потоку. Витрати повітря залежно від швидкості вентилятора описуються многочленом четвертого порядку [4]. Це рівняння реалізовано в моделі за допомогою блоку "c2Fa". Приймається, що зворотній клапан повністю відкритий (заслінка зовнішнього повітря повністю закрыта) і являє собою максимальний повітряний потік, доступний для будь-якої швидкості вентилятора.

$$F_a = 1,23 \cdot 10^{-8} C_{bs}^4 - 3,93 \cdot 10^{-8} C_{bs}^3 + 3,77 \cdot 10^{-4} C_{bs}^2 - 2,32 \cdot 10^{-3} C_{bs} - 1,67 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

Позиція заслінки рециркуляційного/ зовнішнього повітря впливає на витрати. Заслінки з'єднані між собою, тому позиції обох визначаються сигналами

лом клапана управління ( $C_{dr}$ ). Блок "AdjFa" прогнозує потік повітря, (як частку повітря, що подається з максимально можливого), в залежності від положення заслінки. Цей зв'язок є нелінійним і апроксимується за допомогою полінома 3-го порядку [5].

$$F_{a,adj} = -0,0233C_{dr}^3 - 0,0287C_{dr}^2 + 0,112C_{dr} + 0,933. \quad (2)$$

Загальна модель вентилятора сформована шляхом пропускання сигналу, отриманого множенням значення потоку повітря з блоку "c2Fa" з сигналом блоку корекції швидкості потоку, що залежить від положеннях заслінки (блок "AdjFa"), через блок, що представляє динаміку потоку повітря.

**Математична модель змішувальної камери.**

Змішувальна камера являє собою камеру у повітропроводі, перед нагрівальним елементом, з повітропроводами зовнішнього та зворотного повітря. Дросельні заслінки використовуються для зміни площі повітропроводів, тим самим керуючи співвідношенням зовнішнього і зворотного повітря, що виходить зі змішувальної камери. Хоча можна змінювати положення заслінок незалежно, в системах СОВКП вони зазвичай з'єднані між собою та діють скоординовано. В досліджуваній системі, зовнішні та зворотні повітря заслінки повітря з'єднані таким чином, щоб підтримувати постійне значення відкритої площі трубопроводу. Це дозволяє за допомогою заслінок варіювати співвідношення між зовнішнім і зворотним повітрям з невеликими відхиленнями в швидкості повітряного потоку.

Площа перетину заслінки варіюється шляхом обертання паралельних пластин. Хоча приводи заслінок є лінійними пристроями, перетворення поступального руху в обертаний забезпечується важелем, що призводить до нелінійної залежності між лінійними положенням приводу і кутом повороту пластин заслінки. Цей нелінійний зв'язок змодельований для заслінки зворотного повітря рівнянням [6]:

$$A_{dr} = -8,507 \cdot 10^{-7} C_{dr}^4 + 2,051 \cdot 10^{-4} C_{dr}^3 - 0,0172C_{dr}^2 + 1,5C_{dr} + 0,7028. \quad (3)$$

Заслінка зовнішнього повітря описується подібним перетворенням лінійного руху до обертального, але при переміщенні приводу заслінки вона змінює стан від повністю відкритого до повністю закритого. Положення поворотної заслінки зовнішнього повітря описується рівнянням [6]:

$$A_{de} = 1,219 \cdot 10^{-6} C_{de}^4 - 2,15 \cdot 10^{-4} C_{de}^3 - 0,0105C_{de}^2 + 0,8725C_{de} + 0,1232. \quad (4)$$

Лінійна залежність між заданими і фактичними позиціями [6]:

$$\hat{C}_{dr} = 6,197 \cdot 10^{-7} C_{dr}^4 - 1,61 \cdot 10^{-4} C_{dr}^3 + 0,015C_{dr}^2 + 0,5160C_{dr} - 0,1964 +$$

$$+0,015C_{dr}^2 + 0,5160C_{dr} - 0,1964. \quad (5)$$

$$\hat{C}_{de} = -1,3102 \cdot 10^{-6} C_{de}^4 + 2,279 \cdot 10^{-4} C_{de}^3 - 0,011C_{de}^2 + 1,1336C_{de} + 0,1208. \quad (6)$$

Після поправки на нелінійну залежність перетворення лінійного руху в обертаний у приводі заслінок зовнішнього і зворотного повітря, камера змішувача змодельована з урахуванням температури та співвідношення двох повітряних потоків і їх динаміки (рис. 4). Блок "NormCdr" відображає масштабування заданого сигналу повороту зворотної заслінки  $C_{dr}$  від діапазону напруги керування до діапазону [-1; 0] де -1 відповідає повністю відкритому положенню клапана рециркуляційного повітря. Оскільки заслінка зовнішнього повітряна "з'єднана" з заслінкою зворотного повітря, то нормалізована команда керування зворотної заслінки,  $\tilde{C}_{de}$  отримується за допомогою залежності  $\tilde{C}_{de} = C_{dr} + 1$ . В стаціонарному стані, температура повітря, що виходить з камери змішувача описується рівнянням

$$\tilde{T}_{ai} = (C_{dr} + 1)T_{ae} - C_{dr}T_{ar}. \quad (7)$$

Блок "Динаміка потоку" (рис. 5) використовується для отримання відповідної динаміки моделі.

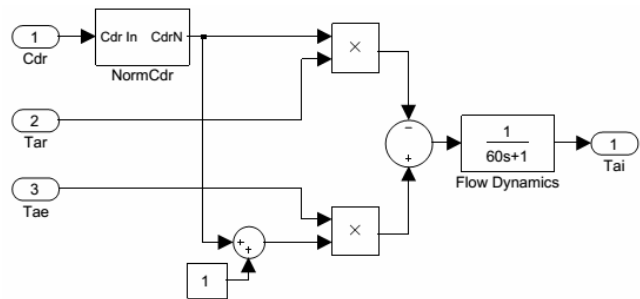


Рис. 4. Модель змішувальної камери

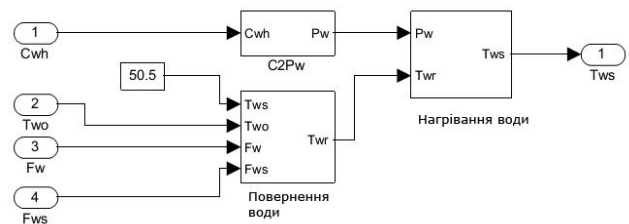


Рис. 5. Модель котла

**Математична модель котла.** Підсистема котла складається з електричного водонагрівача, керуваного перетворювача напруги (для зміни потужності, що підводиться до нагрівальних елементів) і водяного насоса з постійною подачею. Оскільки витрата води  $F_{ws}$  майже постійна, її вплив на температуру води на виході котла незначний. Таким чином, температура води з котла  $T_{ws}$  залежить від температури води, що повертається в котел, і потужності, що подається на нагрівач  $P_{ws}$ . Модель котла складається з трьох блоків (рис. 5). Блок "Повернен-

ня води" моделює температуру, що повертається в котел для нагрівання. Блок "C2Pw" моделює електричну потужність, що подається на нагрівач води, у відповідь на команду керування, що надходить на водонагрівача  $C_{wh}$ . Останній блок моделює водонагрівач, що нагріває повернену воду у відповідності до електричної потужності, що надходить. Динаміка котла також включена в цей блок.

Середня температура води, що повертається в котел,  $T_{wr}$  визначається співвідношенням і температурою води, що повертається з теплообмінника і тією, що повертається в обхід теплообмінника. Для розрахунку  $T_{wr}$  потрібно чотири параметри: швидкість потоку і температуру води що надходить до теплообмінника  $F_{ws}$  і  $T_{ws}$ , швидкість потоку і температура води, що надходить з теплообмінника  $F_w$  і  $T_{wo}$ . Блок "Повернення води" реалізує рівняння (8), що використовується для розрахунку температури води, що повертається в котел (рис. 6)

$$T_{wr} = \frac{T_{wo}F_w + (T_{ws} - 0,5)F_{ws}F_w}{F_{ws}} \quad (8)$$

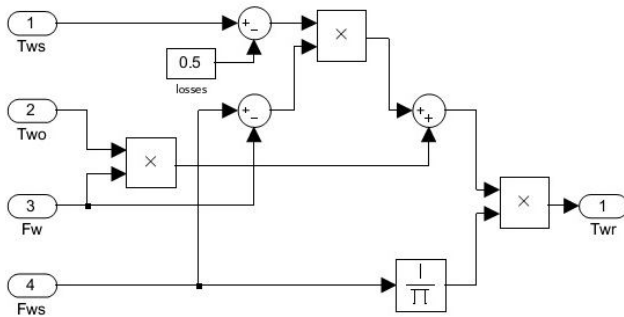


Рис. 6. Блок моделювання температури води, що повертається з котла

Завдання регулятора (напряга)  $C_{wh}$  використовується для зміни величини живлення змінного струму, що подається на нагрівач води. Це лінійна залежність визначається рівнянням (9) і реалізована у блоці "C2Pw" (рис. 7):

$$P_w = 4833,5C_{wh} - 2523,21 \quad (9)$$

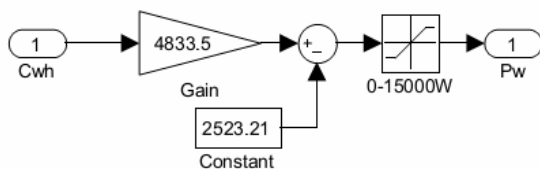


Рис. 7. Блок, що моделює перетворювача сигналу завдання у потужність

Використовуючи виходи попередніх двох блоків ( $T_{wr}$  і  $P_w$ ) як виходи, блок "Нагрівання води" моделює температуру води на виході з котла ( $T_{ws}$ ) (рис. 8). Електроенергія  $P_w$ , що подається на нагрівач води, нагріває воду, що повертається в котел ( $T_{wr}$ ), підвищуючи її температуру у залежності від витрат води  $F_{ws}$  і підведеної потужності. Оскільки

витрати води через теплообмінник системи є майже незмінними, то вони прийняті постійними. Блок враховує як зростання стаціонарної температури у відповідності передавальної функції "TF" до потужності, що подається на нагрівач води  $P_w$ , так і динаміку виходу водонагрівача. Оскільки швидкість потоку води через водонагрівач є постійною, то постійна транспортна затримка є адекватною для моделювання переміщення води з входу водонагрівача на його вихід.

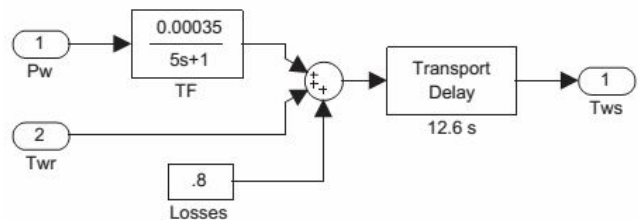


Рис. 8. Модель водонагрівача

**Модель клапана керування потоком води.** Тресторонній клапан управління потоком води рівнопропорційного типу має нелінійну залежність між положенням клапана і витратами води. Тресторонній клапан регулює витрати гарячої води, що йде на теплообмінник, повертаючи частину потоку назад в котел в обхід водонагрівача. Цей потік в поєднанні з водою, що повертається з теплообмінника, забезпечує достатньо "постійний" потік води через насос і котел. Клапан позиціюється за допомогою поршня і пневматичного приводу пружинного типу, оснащеного "реле позитивного позиціонування". Електропневматичний перетворювач використовується для управління пневматичним тиском, що прикладається до приводу пропорційно прикладеної напруги.

Модель клапаном управління потоком води, складається з п'яти каскадних блоків, що представляють потік води через нагрівальний елемент ( $F_w$ ) і сумарний потік води через систему ( $F_{ws}$ ) відповідно до зміни заданого положення управляючого клапана (рис. 9).

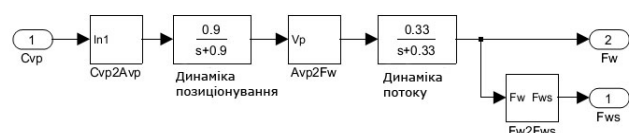


Рис. 9. Модель клапана керування потоком води

Перший блок, "Cvp2Avp", встановлює залежність між заданим положенням клапана та вимірним стаціонарним положенням клапана. Другий блок являє систему першого порядку, що представляє динаміку приводу. "Avp2Fw" зв'язує стаціонарний потік води та (фактичне) положення клапана. Це нелінійне співвідношення, що описується рівнянням полінома четвертого порядку.

$$F_w = 4,5 \cdot 10^{-6} A_{vp}^4 - 4,9 \cdot 10^{-12} A_{vp}^3 - 6,9 \cdot 10^{-8} A_{vp}^2 + 4,5 \cdot 10^{-6} A_{vp} - 7,78 \cdot 10^{-6} \quad (10)$$

Четвертий блок використовує систему першого порядку (з постійною часу  $T \approx 0,066$  с), для перетворення динаміки води, що протікає через нагрівальний елемент. Теплообмінник створює більший опір потоку води, ніж обхідний ланцюг. Таким чином, загальна швидкість потоку води (що проходить через котушку і що проходить повз неї) змінюється залежно від положення клапана (або від потоку води через теплообмінник). Останній блок, "Fw2Fws", прогнозує сумарний потік води через систему ( $F_{ws}$ ) залежно від потоку води через нагрівальний елемент. Для опису залежності використаний поліном третього порядку[7].

$$F_{ws} = -240966F_w^3 + 888,2F_w^2 - 0,539154F_w + 0,0006376 \quad (11)$$

Ці п'ять блоків, реалізовані з використанням Simulink, реалізують підсистему клапана.

**Математична модель теплообмінника.** Теплообмінник використовується в системі як чотирьохпрохідний теплообмінник вода-повітря з зустрічною течією. Передача теплової енергії від води до повітря залежить від фізичних властивостей теплообмінника і є функцією швидкості потоку і температур двох рідин (води і повітря). Залежності між входами виходами є нелінійними. Як згадувалося раніше, динамічне моделювання теплообмінника з зустрічною течією, особливо багатопрохідного типу, є досить складним. Тому використана лінійна модель в окрузі робочої точки [8]. Робоча точка (табл. 3) обрана таким чином, щоб забезпечити гарний робочий діапазон, досяжний у межах помірних температур.

Таблиця 3

Робоча точка лінійної моделі теплообмінника		
$T_{ai}$	Температура повітря в теплообміннику	19,8°C
$F_a$	Швидкість зворотнього повітря через сист.	0,29 м <sup>3</sup> /с
$T_{wi}$	Температура води в теплообміннику	50°C
$F_w$	Швидкість потоку води через теплообмін.	0,0004 м <sup>3</sup> /с
$T_{wo}$	Температура води з теплообмінника	36,1°C
$T_{ao}$	Температура повітря з теплообмінника	40,8°C

Теплообмінник представлений у вигляді системи 2 x 4, що має чотири входи (табл. 3) і два виходи  $-T_{ao}$ ,  $T_{wo}$  – температури повітря і води з теплообмінника, відповідно. Теплообмінник змодельований у вигляді двох підсистем 1x4, що мають ті ж самі чотири входи (рис. 10). Підсистема "Контур повітря" моделює температуру повітря з теплообмінника, а підсистема "Водяний контур" – температуру води з теплообмінника.

Підсистема "Водяний контур" (рис 10) моделює температуру води, що виходить з котушки, у залежності від чотирьох входів. Таким чином, "Во-

дяний контур" можна розглядати як представлення водяної частини нагрівального змійовика. Маса нагрівальної спіралі забезпечує теплоємністю, що викликає експоненційну (першого порядку) затримку виходу. Крім того, трубопровід нагрівача має довжину більше 14 метрів і, таким чином, має температурний градієнт, а також транспортну затримку. У моделі використовується середня температура на котушці, а затримки представлені у вигляді однієї транспортної затримки.

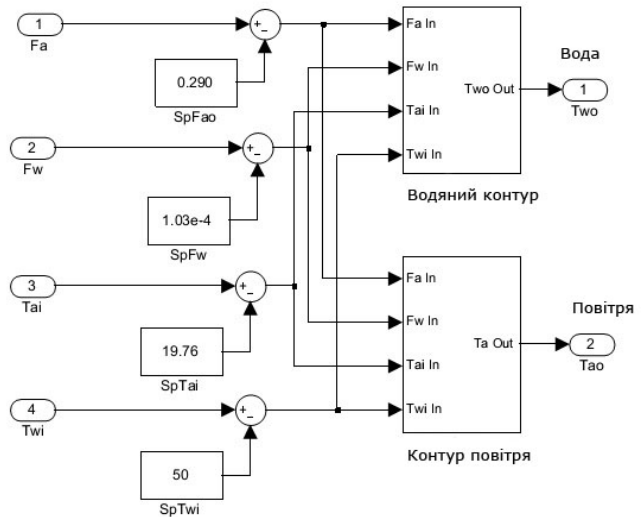


Рис. 10 – Математична модель теплообмінника

Кожен вхід теплообмінника має відповідну передавальну функцію, що зв'язує його з виходом. Для моделювання "водної" частини теплообмінника, використовуються чотири передавальні функції і чотири транспортні затримки, що з'єднані між собою і утворюють підсистему (рис. 11) [9].

$$TF_1 = T_{wo}(F_a) = \frac{-25,8}{30s + 1} \quad (12)$$

$$TF_2 = T_{wo}(F_w) = \frac{0,101}{30s + 1} \quad (13)$$

$$TF_3 = T_{wo}(T_{ai}) = \frac{0,4279}{s + 1} \quad (14)$$

$$TF_4 = T_{wo}(T_{wi}) = \frac{0,49}{25s + 1} \quad (15)$$

Підсистема "Контур повітря" (рис.12) моделює зміну температури повітря, що виходить з теплообмінника, залежно від чотирьох входів. Можна вважати, що ця підсистема представляє "повітряну" частину теплообмінника. Як і в підсистемі "Водяний контур", вона складається з чотирьох ланок затримки і передавальних функцій, зв'язаних між собою. Передавальні функції, що описуються рівняннями:

$$TF_1 = T_{ao}(F_a) = \frac{-30}{65s + 1} \quad (16)$$

$$TF_2 = T_{ao}(F_w) = \frac{0,05}{55s + 1} \quad (17)$$

$$TF_3 = T_{ao}(T_{ai}) = \frac{0,21}{4s+1}, \quad (18)$$

$$TF_4 = T_{ao}(T_{wi}) = \frac{0,79}{50s+1}. \quad (19)$$

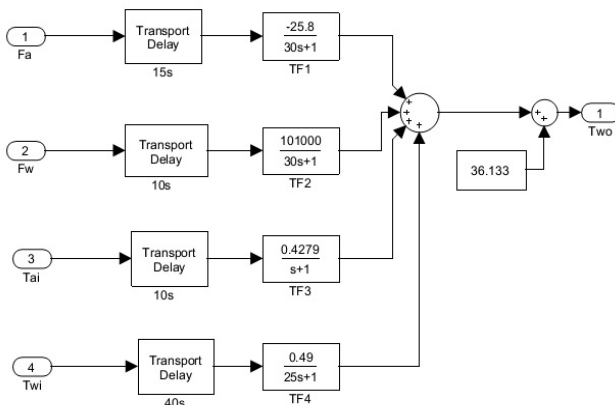


Рис. 11. Модель водяного контуру теплообмінника

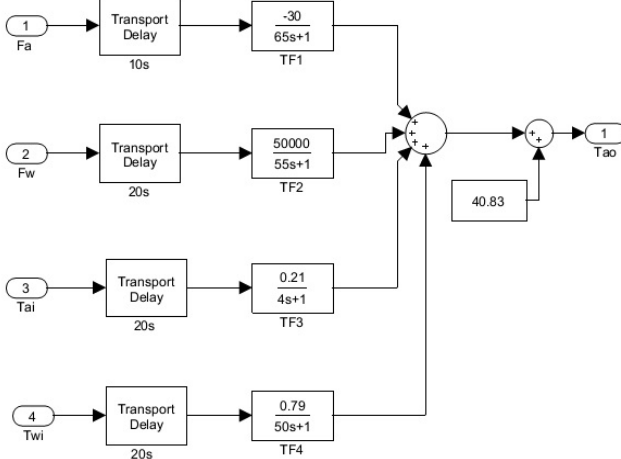


Рис. 12. Контур повітря теплообмінника

## ВИСНОВКИ

Отримана математична модель системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря є нелінійною системою, яку умовно можна розбити на 5 підсистем, що теж є нелінійними.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ, КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Д.Н. Нелюба, М.Н. Гонтар

В статье разрабатывается математическая модель системы отопления, вентиляции и кондиционирования, как объекта управления, пригодной для дальнейшего использования при разработке автоматических систем регулирования. Полученная нелинейная модель является собой многосвязную систему с 6 входами и 8 выходами и может быть разложена на 5 подсистем, которые также являются нелинейными системами.

**Ключевые слова:** математическая модель, отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха, СОВКП.

## HEATING, VENTILATING AND AIR CONDITIONING SYSTEM, AS PLANT, MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT

D.M. Neliuba, M.M. Hontar

The article discusses development of heating, ventilating and air conditioning system mathematical model, as plant, suitable for further use in automatic control systems development. The resulting nonlinear model is multiple input - multiple output system with 6 inputs and 8 outputs, and can be decomposed into 5 sub-systems, which are also non-linear systems.

**Keywords:** mathematical model, heating, ventilation, air conditioning, HVAC.

Отримані нелінійні математичні моделі підсистем СОВКП, дозволяють з достатньою точністю моделювати їх роботу як окремо, так і всієї системи в цілому.

Оскільки синтез автоматичних регуляторів для нелінійної системи є складною задачею, а параметри роботи СОВКП не значно змінюються протягом часу її роботи, в подальших дослідженнях доцільно виконати лінеаризацію моделей підсистем СОВКП та системи в цілому в околі робочої точки.

## Список літератури

1. Benitez J.M. Fuzzy Control of HVAC Systems Optimized by Genetic Algorithms / J.M. Benitez, J. Casillas, O. Cordon, R. Perez. – *Applied Intelligence* 18, 2003. – Pp. 155–177.
2. Intelligent Energy - Europe (IEE) - ALTENER Projects (Renewable energy sources) <http://www.managenergy.net/resources/639>
3. Bruant M. Impact of a global control of bioclimatic buildings in terms of energy consumption and building's performance / M. Bruant, G. Guarracino, P. Michel, A. Voeltzel, M. Santamouris. – *Proc. of the 4th European Conference on Solar Architecture and Urban Planning, Berlin, 1996.* – Pp. 537–540.
4. Поляков В.В. Насосы и вентиляторы / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990 – 336 с.
5. Брусиловский И.В. Аэродинамический расчёт осевых вентиляторов / И.В. Брусиловский. – М.: Машиностроение, 1986. – 283 с.
6. Дзелзитис Э.Э. Управление системами кондиционирования воздуха: Справочное пособие / Э.Э. Дзелзитис. – М.: Стройиздат, 1990. – 176 с.
7. Кафаров В.В. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
8. Богословский В.Н. Отопление / В.Н. Богословский, А.Н. Сканава. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
9. Anderson M. MIMO Robust Control for Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems / M. Anderson, M. Buehner, P. Young, D. Hittle, C. Anderson, Tu Jilin, D. Hodgson // *Control Systems Technology, IEEE Transactions on.* – May 2008. – V. 16, I. 3. – P. 475-483.

Надійшла до редколегії 12.10.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.