

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.66-78](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.66-78)

Д.В. Голуб, доц., канд. техн. наук, В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Dimchik529@gmail.com, AulinVV@gmail.com

Математична модель підвищення якості управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля

Проведено аналіз досліджень систем управління мікрокліматом салону автомобіля та сформульовані вимоги до кліматичного комфорту простору, що оточує людину в процесі експлуатації транспортного засобу. Обґрунтовано необхідність формування системи управління кліматичним комфортом як мехатронної системи автомобіля, що має підвищену швидкодію, узгодженість і точність регулювання величин для його визначення.

Запропоновано перелік показників, які найточніше враховують сукупний вплив на кліматичний комфорт в мультizonному робочому просторі та дозволяють підвищити якість функціонування мехатронної системи управління мікрокліматом салону автомобіля.

Розроблено математичну модель підвищення якості управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля. Модель описує багатовимірний нелінійний електропневмомеханічний об'єкт управління та його структуру.

Досліджено динамічні властивості цифрових стежачих приводів на основі колекторних двигунів постійного струму, що входять до складу виконавчої частини мехатронної системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля.

Розроблено алгоритм реалізації моделі в середовищі Matlab Simulink, що дозволяє проводити детальне комп'ютерне моделювання процесами управління мехатронною системою кліматичного комфорту з метою підвищення її точності і швидкодії.

Запропоновано принципи формування багатоканального регулятора мехатронної системи на основі інверсних моделей. Ці принципи відображують статичні властивості нелінійного об'єкту управління та підвищують узгодженість реакцій каналів системи управління мікрокліматом салону автомобіля.
мехатронна система, моделювання, мікроклімат, салон автомобіля, автоматичне управління, регулятор, цифровий стежачий привід

Постановка проблеми. Підвищення якості функціонування автомобільних мехатронних систем управління [1-3], в т. ч. і мікрокліматом салонів різноманітних видів транспортних засобів (ТЗ), є актуальною проблемою, що має велике значення для функціонування транспортної галузі країни. Це передусім кліматичний комфорт мультizonного робочого простору салонів легкових та вантажних автомобілів, громадського транспорту різних видів [4], спеціалізованих транспортних засобів, транспортної та мобільної сільськогосподарської та іншої техніки. Ефективність і безпека функціонування таких об'єктів значною мірою залежить від самопочуття і працездатності їх операторів. Для кожного з ТЗ повинні створюватися і автоматично підтримуватися сприятливі кліматичні умови в різних зонах робочого простору [5].

Незважаючи на поширеність систем управління мікрокліматом салону ТЗ, підвищення їх точності і швидкодії досліджені недостатньо. Існуючі методи орієнтовані, в основному, на створення розімкнених систем з ручним управлінням. Оскільки

вимоги до їх якості безперервно зростають, то доцільна розробка більш досконалих замкнених систем автоматичного управління (САУ) станом робочого простору салону ТЗ. Такі системи мають бути здатні коректно враховувати комбінований вплив температури, вологості, швидкості руху повітряного потоку і фізіологічних особливостей оператора на сприйняття їм кліматичного комфорту в середині салону ТЗ [6]. Саме ці чинники роблять актуальними дослідження в області автомобільних кліматичних систем комфорту салону ТЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз існуючих даних по проблемах створення систем мікроклімату салону автомобіля, моделювання, проектування і управління таких мехатронних систем [3-6], показав, що підхід до підбору джерел інформації визначається тим, що дана система, маючи ознаки мехатронної, практично не описувалася в термінах мехатроніки.

Особливістю даних систем є те, що вони містять специфічні нелінійні багатокоординатні об'єкти управління. Вони об'єднують у своєму складі взаємодіючі механічні, електричні, пневматичні і комп'ютерні компоненти [7-9]. Тому вирішення завдання побудови високоякісних систем управління кліматичним комфортом салону автомобіля вимагає застосування принципів і методів, характерних для мехатроніки [10]. Через складність таких об'єктів управління доцільним є використання математичних моделей для формування регуляторів мехатронних систем управління. Такі моделі базуються, передусім, на ідеях і методах, що використовуються в мехатроніці і комп'ютерному управлінні рухом.

Постановка завдання. Метою даної роботи є підвищення точності і швидкодії мехатронних систем управління мікрокліматом в мультизонному замкненому робочому просторі салону автомобіля, побудованих на основі моделі нелінійного об'єкту управління і комплексу пропорційно-інтегральних регуляторів.

Виклад основного матеріалу. Концепція побудови систем управління кліматичним комфортом салону автомобіля, що мають високу точність і швидкодію, повинна базуватися на чіткому формулюванні вимог до їх управління. Складність проблеми створення таких систем обумовлена специфікою їх об'єктів управління, які реалізують управління рухом повітряних потоків і об'єднують у своєму складі електричні, механічні і пневматичні компоненти, що тісно взаємодіють один з одним. Аналіз їх властивостей показує, що вони є нелінійними багатокоординатними динамічними об'єктами з внутрішніми перехресними зв'язками. Високий рівень вимог, що пред'являються до сучасних систем управління кліматичним комфортом салону ТЗ і необхідність погодженого функціонування різнорідних компонентів таких систем, дозволили зробити висновок про формування на основі принципів і методів мехатроніки. Нова структура системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля є замкнутою за показниками комфорту мікроклімату (рис. 1).

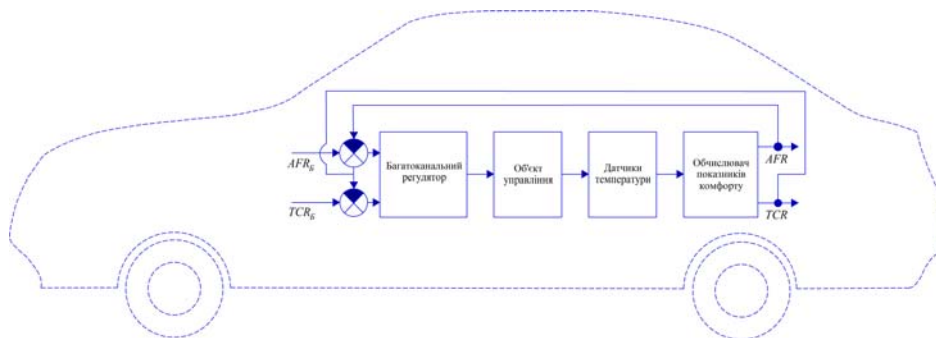


Рисунок 1 - Структурна схема мехатронної системи управління кліматичним комфортом салону сучасного автомобіля

Джерело: розроблено авторами

Для підвищення точності автоматичного регулювання кліматичного комфорту використовують аналітичні залежності двох типів безрозмірних показників комфорту, як функцію змінних стану повітряного середовища, що коректно характеризують рівень комфортності. Змінні першого типу є температурними показниками комфорту TCR_1, \dots, TCR_L (Thermal Comfort Rate), де L - кількість зон регулювання комфорту. Відомо, що кожна людина має відношення до декількох зон робочого простору і може встановити для них бажані значення температурного показника комфорту, задавши їх в діапазоні балів від - 5 до 5, що відповідає значенням температури від $+15^\circ\text{C}$ до $+37^\circ\text{C}$. Взаємозв'язок значень показника комфорту TCR_l в l -ій зоні регулювання комфорту з температурою повітряного потоку $\tau_{екв.l}$, що відчувається людиною, подається у вигляді формули $TCR_l = \frac{\tau_{екв.l} - 299}{2,2}$, причому $l = \overline{1, L}$. Змінні другого типу - показники комфорту за швидкістю руху повітряного потоку AFR_1, \dots, AFR_L (Air Flow Rate). Значення цих показників можуть задаватися в діапазоні балів від 0 до 3. Показник комфорту AFR за швидкістю руху v_l , повітряного потоку в l -ій зоні регулювання комфорту, спрямованого до відповідної ділянки тіла людини, для усіх $l = \overline{1, L}$, визначається за формулою:

$$AFR_l = \frac{V_l - 0,175 - 0,0506 \cdot TCR_l}{1,15 + 0,0396 \cdot TCR_l}, \quad (1)$$

де V_l – швидкість, яка обчислюється за формулою:

$$V_l = g_{вих.l} (\rho A_l)^{-1}, \quad (2)$$

де $g_{вих.l}$ – масова витрата повітря в l -ій зоні;

ρ - щільність повітря;

A_l - площа l -ої зони комфорту.

Регульованими змінними мехатронної системи є вектори показників комфорту:

$$TRC = (TRC_1, \dots, TRC_L)^T; \quad AFR = (AFR_1, \dots, AFR_L)^T, \quad (3)$$

Фактично мова йде про створення комплексу стежачих систем, в каналах розузгоджень яких знаходиться багатоканальний регулятор, керований комп'ютерною системою (КС), який видає керуючі впливи на стежачі приводи, що входять до складу об'єкту управління. Безпосередній вимір векторних змінних TRC і AFR неможливий, а тому вони формуються на підставі показників датчиків температури і витрати введеним до складу системи комп'ютерним обчислювачем показників комфорту. Структура дослідження динамічних властивостей цифрових стежачих приводів здійснюється на основі колекторних двигунів постійного струму (рис. 2). Останні входять до складу виконавчої частини мехатронної системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля.

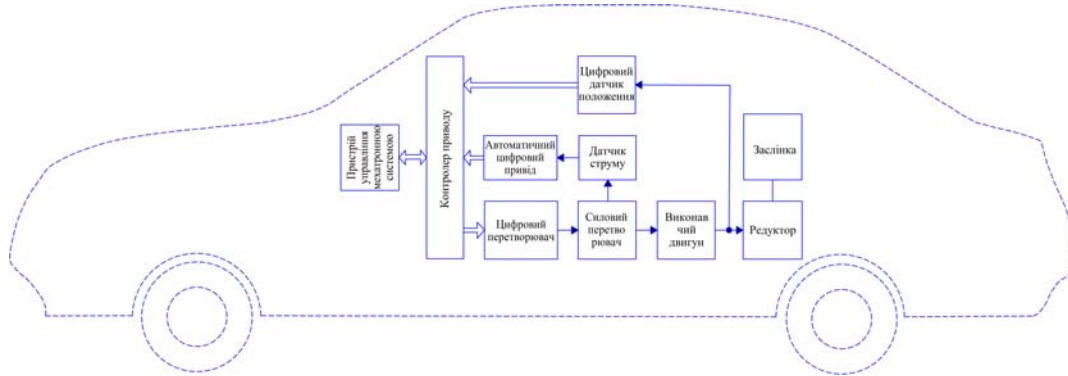


Рисунок 2 - Структура цифрового стежачого приводу мехатронної системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля

Джерело: розроблено авторами

На основі математичного моделювання вибору періоду квантування за часом і значень основних параметрів регуляторів приводів модель відображує найбільш суттєві динамічні властивості замкнутого стежачого приводу.

При розробці нелінійної математичної моделі об'єкту управління у складі системи управління кліматичним комфортом розглядається як сукупність комплексу стежачих приводів і облаштувань нагнітання, охолодження, осушення, нагріву і розподілу повітряних потоків нагрітого і охолодженого повітря, камер змішувачів і каналів подання повітря в різні ділянки мультizonного робочого простору салону автомобіля.

У робочому просторі знаходиться M -та кількість людей (операторів людиномашинної системи). З кожним з них пов'язане N регульованих зон, причому $L = MN$. За допомогою задаючих пристроїв людина має можливість сформулювати сприятливі для неї умови в зонах робочого простору. Інтенсивність подання повітря регулюється за допомогою заслінок в повітропроводах, керованих стежачими приводами при одержанні задаючих дій від контролера системи управління.

Структура моделі управління мехатронною системою кліматичного комфорту салону автомобіля, наведена на рис. 3. Вона сформована в результаті декомпозиції і виділення підсистем за функціональною ознакою.

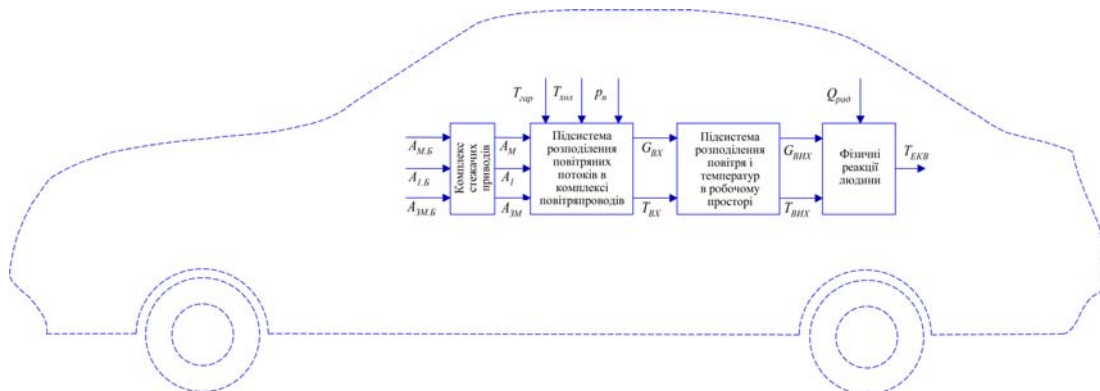


Рисунок 3 - Структура математичної моделі управління мехатронною системою кліматичного комфорту салону автомобіля

Джерело: розроблено авторами

У моделі виділені комплекс стежачих приводів, підсистеми розподілу повітряних потоків в повітропроводах, розподілу повітря і температур в зонах регулювання комфорту робочого простору і блок фізіотермічних реакцій людей, що знаходяться в робочому просторі.

Вхідними діями на комплекс електромеханічних стежачих приводів є $(M \times 1)$ - вектор бажаних кутів повороту заслінок в каналах подання повітря в камери змішувачів $A_{3M.B}$ і $M(N \times 1)$ - векторів бажаних кутів повороту заслінок в каналах подання повітря в робочий простір $A_{1.B}, A_{2.B}, \dots, A_{M.B}$. Компонент $a_{3M.j}(N \times 1)$ - вектора A_{3M} , що реалізується приводом, є фактичним кутом повороту заслінки в каналі подання повітря в i -ту камеру змішувача. Компонент $a_{ij}(N \times 1)$ - вектора A_i - фактичний кут повороту j -ої заслінки в каналі подання повітря з i -ої камери змішувача в обслуговувану зону: $i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$.

Кути повороту заслінок обмежені $0 \leq \alpha_{3M.i} \leq \alpha_{\max}$, $0 \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{\max}$ і впливають на площі перерізу отворів в повітряних каналах відповідно до рівнянь:

$$\begin{aligned} A_{E.ij} &= A_{E.\max} \alpha_{ij} \alpha_{\max}^{-1}; \\ A_{E.GAPj} &= A_{E.3B.\max} \alpha_{3Bj} \alpha_{3B.\max}^{-1}; \\ A_{E.XOЛj} &= A_{E.3B.\max} (\alpha_{3B.\max} - \alpha_{3Bi}) \alpha_{3B.\max}^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Під впливом, що реалізується приводами фактичних кутів повороту заслінок і тиску повітря P_{Π} , що створюється підсистемою стабілізації тиску наддуву, температур гарячого T_{GAP} і холодного $T_{ХОЛ}$ повітря в підсистемах нагріву і охолодження. При цьому формується $L = N \times M$ повітряних потоків, що виходять з випускних отворів підсистеми розподілу повітря і потрапляють в робочий простір. Ці потоки характеризуються $(N \times M)$ - векторами масових витрат $(G_{BX.1}, G_{BX.2}, \dots, G_{BX.M})$ і векторами температур $(T_{BX.1}, T_{BX.2}, \dots, T_{BX.M})$.

Вихідними змінними підсистеми розподілу повітря і температур в робочому просторі є $M(N \times 1)$ - векторів масових витрат повітряних потоків, що утворюються в контрольованих зонах в результаті перемішування потоків, що виходять з випускних отворів підсистеми розподілу повітря, $(G_{ВИХ.1}, G_{ВИХ.2}, \dots, G_{ВИХ.M})$ і $M(N \times 1)$ - векторів еквівалентних температур, що відчуюються операторами в регульованих зонах робочого простору $(T_{ВКВ.1}, T_{ВКВ.2}, \dots, T_{ВКВ.M})$.

Відмітною особливістю запропонованої моделі об'єкту управління є включення до її складу моделі фізіотермічних реакцій людини. Ця модель характеризує зв'язок компонент $(L \times 1)$ - вектора температур повітря $T_{ЕКВ} = (\tau_{ЕКВ.1}, \tau_{ЕКВ.2}, \dots, \tau_L)^T$, що відчувається людиною в зонах робочого простору з вектором реальних температур $T = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_L)^T$ повітряних потоків в цих зонах.

На основі зазначеного сформована найбільш зручна для побудови системи управління форма моделі:

$$\frac{d\tau_{ЕКВ.l}}{dt} = \frac{(k_{\Pi}\tau_l + k_{ml}g_{вих.l} + k_{сепл}T_{сеп} + k_{Ql}Q_{рад} - \tau_{екв.l})}{T_{ФР.l}}, \quad (5)$$

де індекс l - номер регульованої зони, причому $l = 1, \dots, L$;

$k_{\Pi}, k_{ml}, k_{сепл}, k_{Ql}$ - коефіцієнти впливу на еквівалентну температуру $\tau_{екв.l}$, температура повітря τ_l масової витрати $g_{вих.l}$, середньої температури довкілля $T_{сеп}$ і інтенсивності сонячної радіації $Q_{рад}$;

$T_{\Phi P, l}$ - постійна часу аперіодичної ланки, що характеризує динамічні властивості моделі фізіотермічних реакцій.

При цьому модель камер змішувачів дозволяє визначити вектори тиску (p_{c1}, \dots, p_{cM}) і температури (T_{c1}, \dots, T_{cM}) повітря, що утворюються в цих камерах, з урахуванням температур того, що поступає в них нагрітого $T_{ГАР}$ і охолодженого $T_{ХОЛ}$ повітря.

Модель i -ої камери ($i = 1, \dots, M$) змішувача описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dp_{c,i}}{dt} = V_i^{-1} RT_{c,i} (g_{ГАР,i} + g_{ХОЛ,i} - g_{\Sigma,i}) + V_i^{-1} R m_{c,i} \frac{dT_{c,i}}{dt}; \\ \frac{dT_{c,i}}{dt} = m_{c,i}^{-1} (g_{ГАР,i} T_{ГАР,i} + g_{ХОЛ,i} T_{ХОЛ,i} - g_{\Sigma,i} T_{c,i}); \\ \frac{dm_{c,i}}{dt} = g_{ГАР,i} + g_{ХОЛ,i} - g_{\Sigma,i}, \end{cases} \quad (6)$$

де $V_i, m_{c,i}$ - відповідно об'єм i -ої камери і маса повітря, що знаходиться в ній;

R - газова постійна;

$T_{c,i}$ - абсолютна температура повітря;

$g_{ГАР,i}, g_{ХОЛ,i}$ - відповідно масові витрати нагрітого і охолодженого повітря, що поступає в камеру; $g_{\Sigma,i}$ - масова витрата повітря, що витікає з i -ої камери, причому:

$$g_{\Sigma,i} = \sum_{j=1}^N g_{ex,ij}. \quad (7)$$

Компоненти вектору тиску (p_{c1}, \dots, p_{cN}) близькі до атмосферного. Тому виникає докритичний режим течії повітря через отвори, регульовані приводами із заслінками, і витрати можуть бути визначені за допомогою системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} g_{ГАР,i} = A_{Е,ГАР,i} \sqrt{2(RT)^{-1} p_{c,i} (p_{n,ГАР} - p_{c,i})}; \\ g_{ХОЛ,i} = A_{Е,ХОЛ,i} \sqrt{2(RT)^{-1} p_{c,i} (p_{n,ХОЛ} - p_{c,i})}. \end{cases} \quad (8)$$

де $A_{Е,ГАР,i}$ і $A_{Е,ХОЛ,i}$ - відповідно ефективні площі отворів в каналах подання гарячого і холодного повітря;

$p_{n,ГАР}$ і $p_{n,ХОЛ}$ - відповідно тиски в магістралях подання гарячого і холодного повітря, причому виконується умова:

$$p_{n,ГАР} = p_{n,ХОЛ} = p_n. \quad (9)$$

Математична модель підсистеми розподілу повітряних потоків описує M груп повітряних каналів, по яких повітря подається в регульовані зони робочого простору. Кожна група містить N каналів, що починаються у камері змішувача і закінчуються вихідним отвором у безпосередній близькості від відповідної обслуговуваної зони робочого простору.

Для усталеного режиму j -го каналу i -ої групи повітропроводів справедливе нелінійне рівняння алгебри, що зв'язує масову витрату повітря $g_{ex,ij}$ при турбулентній

течії з тиском в i -ій камері змішувача. Результуючим пневматичним опором каналу r_{ij} і вихідним отвором, площа якого $A_{E,ij}$, регулюється сервоприводом:

$$g_{ex,ij} = A_{ij} C \sqrt{(p_{ci} - p_a)}, \quad (10)$$

$$\text{де } A_{ij} = A_{E,ij} \left[1 + A_{E,ij}^2 r_{ij} 2(RT)^{-1} p_a \right]^{\frac{1}{2}}; C = \sqrt{2(RT)^{-1} p_a}; r_{ij} = l_{ij} v^{\frac{1}{4}} (4\rho d_{ij}^5)^{-1}, \quad (11)$$

p_a - атмосферний тиск;

l_{ij}, d_{ij} - відповідно довжина і діаметр повітропроводу;

v і ρ - коефіцієнт кінематичної в'язкості і щільність повітря за нормальних умов;

$j = \overline{1, N}, i = \overline{1, M}$.

На основі цього встановлено, що об'єкт управління є багатозв'язковим. Модель підсистеми розподілу повітря і температур всередині робочого простору характеризується рівнянням:

$$G_{ВИХ} = W G_{ВХ}, \quad (12)$$

де W - $(L \times L)$ - квадратна матриця коефіцієнтів впливу вектора $(w_{11}, w_{12}, \dots, w_{LL})$ потоків повітря, що виходять з випускних отворів підсистеми розподілу повітря. Потоки, що утворюються в результаті їх часткового змішування в обслуговуваних зонах робочого простору здійснюють безпосередній вплив на комфортність повітряного середовища.

Коефіцієнти, що характеризують властивості робочого простору, визначаються експериментально і є емпіричними оцінками перехресних зв'язків, існуючих в об'єкті системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля.

Отримана математична модель об'єкту управління є системою $2M(2+N)$ нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку у формі Коши. На цій підставі дані системи можна віднести до класу великих мехатронних систем.

Нова структура мехатронної системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля з багатоканальним регулятором базується на його заснуванні з використанням інверсних математичних моделей об'єкту управління і повної математичної моделі системи, властивості якої досліджено за допомогою комп'ютерних програм.

З урахуванням високої розмірності, нелінійності властивостей і багатозв'язковості об'єкту управління для отримання високої якості процесів управління застосований компенсаційний підхід. Він заснований на використанні зворотної (інверсної) математичної моделі об'єкту управління та запропоновано двохкаскадний багатоканальний регулятор. Його першим (зовнішнім) каскадом є комплекс пропорційно-інтегральних регуляторів (Пі-регуляторів), призначених для поліпшення динамічних властивостей системи (рис. 4).

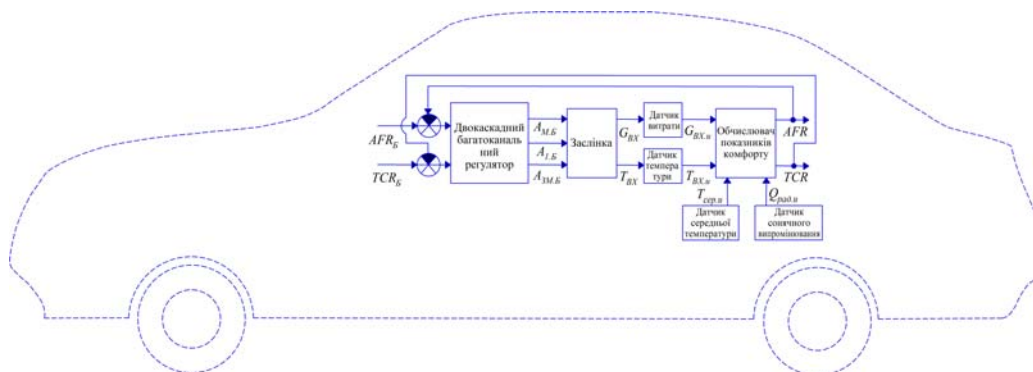


Рисунок 4 - Структура мехатронної системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля на основі інверсної моделі і комплексу Пі-регуляторів

Джерело: розроблено авторами

Другим (внутрішнім) каскадом є блок корекції статичних характеристик нелінійного об'єкту управління. Він побудований на базі інверсної моделі об'єкту управління, справедливої для усталеного режиму. При цьому розглянута статична модель об'єкту, що характеризується системою нелінійних алгебраїчних рівнянь та виконана її декомпозиція. Для усіх її компонентів сформовані часткові інверсні моделі. При формуванні комплексу інверсних моделей компонентів об'єкту управління використані аналітичні методи інверсії алгебраїчних залежностей. Це є головною особливістю пропонованого підходу до створення систем управління станом мультизонного повітряного середовища салону автомобіля.

Вхідними впливами блоку корекції є два вектори: $U_{TCR} = (u_{TCR1}, u_{TCR2}, \dots, u_{TCRL})^T$ та $U_{AFR} = (u_{AFR1}, u_{AFR2}, \dots, u_{AFRL})^T$, які формуються на виходах комплексу Пі-регуляторів і використовуються для формування компонентів вектору $(A_{3M.B}, A_{L.B}, \dots, A_{M.B})$ впливів на виконавчу частину системи.

Розроблений алгоритм управління, використовуючи вектори U_{TCR} і U_{AFR} , дає можливість обчислити вектори $T_{EKB} = (\tau_{EKB.1.B}, \dots, \tau_{EKB.L.B})^T$ і $G_{BHX.B} = (g_{BHX.1.B}, \dots, g_{BHX.L.B})^T$. Їх компоненти входять до складу векторів T_{EKB} і G_{BHX} , компоненти яких $\tau_{EKB.l.B}$ і $g_{BHX.l.B}$ для усіх $l = \overline{1, L}$ обчислюються по формулах:

$$\tau_{EKB.l.B} = 2,2 \cdot u_{TCR.l} + 299; \quad (13)$$

$$g_{BHX.l.B} = \rho A_l u_{AFR.l} [1,15 + 0,018 \cdot (\tau_{EKB.l} - 299)] + 0,175 + 0,023 \cdot (\tau_{EKB.l} - 299). \quad (14)$$

Значимо, що компоненти вектора $G_{BX.B} = (g_{BX.1.B}, \dots, g_{BX.L.B})^T$ визначаються за допомогою рівняння:

$$G_{BX.B} = W^{-1} G_{BHX.B}. \quad (15)$$

Це дає можливість вичислити бажані значення $g_{ex.ij.\delta} = g_{ex.m.\delta}$ для усіх $i = 1, \dots, M$ і $j = 1, \dots, N$, задаючи $m = N(i-1) + j$. Компоненти векторів бажаних значень температур в регульованих зонах $T_{\delta} = (\tau_{l.\delta}, \dots, \tau_{L.\delta})^T$ і на виходах повітропроводів $T_{BHX.\delta} = (\tau_{BHX.1.\delta}, \dots, \tau_{BHX.L.\delta})^T$ обчислюються по формулах:

$$\tau_{l,\delta} = (\tau_{екв.l,\delta} - k_{ml} g_{ВНХ.l,\delta} - k_{cp,l} T_{сер.u} - k_{Ql} Q_{рад.u}) k_{Тl}^{-1}; \quad (16)$$

$$\tau_{ВНХ.l,\delta} = (\tau_{l,\delta} - T_{сер.u}) (1 - \exp(-\phi_{l,\delta}))^{-1} - T_{сер.u}, \quad (17)$$

де $T_{сер.u}$ і $Q_{рад.u}$ - виміряні датчиками середня температура робочого простору і потужність сонячної радіації, що поступає в нього;

$$\phi_{l,\delta} = g_{вух.l,\delta} g_{norm.l}^{-1}; \quad l = 1, \dots, L.$$

Вектор бажаних температур повітряних потоків, що виходять з отворів повітропроводів кліматичної мехатронної системи автомобіля, визначається по формулі:

$$T_{ВХ.\delta} = W_{\delta\delta}^{-1} T_{ВНХ.ж}, \quad (18)$$

де $W_{\delta\delta}$ - матриця, що має наступну структуру:

$$W_{\delta\delta} = \begin{pmatrix} g_{вух.1,\delta}^{-1} W_{11} g_{ex.1} & g_{вух.1,\delta}^{-1} W_{12} g_{ex.2} & \dots & g_{вух.1,\delta}^{-1} W_{1L} g_{ex.L} \\ g_{вух.2,\delta}^{-1} W_{21} g_{ex.1} & g_{вух.2,\delta}^{-1} W_{22} g_{ex.2} & \dots & g_{вух.2,\delta}^{-1} W_{2L} g_{ex.L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{вух.L,\delta}^{-1} W_{L1} g_{ex.1} & g_{вух.L,\delta}^{-1} W_{L2} g_{ex.2} & \dots & g_{вух.L,\delta}^{-1} W_{LL} g_{ex.L} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Бажані температури в камерах змішувачів і масові витрати нагрітого повітря, що поступає в них, обчислюються за допомогою рівнянь:

$$T_{zi,\delta} = \tau_{ex.q,\delta}, \quad g_{zap.i,\delta} = g_{\sum i,\delta} (T_{ci,\delta} - T_{хол.i}) (T_{zap.i} - T_{хол.i})^{-1}, \quad (20)$$

$$\text{де } q = N(i-1) + j; \quad g_{\sum i,\delta} = \sum_{j=1}^N g_{ex.ij,\delta}.$$

Розрахункове значення тиску повітря в камері змішувача $p_{ci,*}$, в режимі, що встановився, служить основою для обчислення регульованих приводами бажаних площ отворів в повітропроводах і на входах камер змішувачів:

$$\begin{cases} A_{E.ij,\delta} = A_{ij,\delta} [1 - r_{ij} A_{ij,\delta}^2 p_a C^2]^{-\frac{1}{2}}; \\ A_{E.zap.j,\delta} = g_{zap.j,\delta} [2 p_{ci,*} (p_n - p_{ci,*}) (RT)^{-1}]^{-\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{де } A_{ij,\delta} = g_{ВХ.ij,\delta} \left[C (p_{ci,*} - p_a)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}, \quad C - \text{параметр системи.}$$

Підсумком обчислень, що виконуються блоком корекції, є бажані кути повороту заслінок мехатронної системи мікроклімату салону автомобіля, які визначаються за допомогою системи рівнянь, що реалізуються за допомогою стежачих приводів:

$$\begin{cases} \alpha_{ij,\delta} = \alpha_{\max} A_{E.ij,\delta} A_{E.ij,\delta}^{-1}; \\ \alpha_{зм.i,\delta} = \alpha_{\max} A_{E.zap.j,\delta} A_{E.зм,max}^{-1}. \end{cases} \quad (22)$$

Головна перевага управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля полягає в тому, що завдяки введенню блоку корекції в усталеному режимі забезпечується «розв'язка» каналів управління і зниження впливу нелінійностей. Це стабілізує значення коефіцієнтів передачі усіх каналів скоректованої системи, які

стають близькими до одиниці. Запропоноване дозволяє істотно спростити структуру першого каскаду регулятора і методику налаштування його параметрів. Значення параметрів ПІ-регуляторів доцільно вибирати з умови забезпечення однакових динамічних властивостей усіх каналів системи управління. Це важливо для узгодженості управління по різних каналах. Перевагою розробленої структури мехатронної системи мікроклімату салону автомобіля є двохкаскадний регулятор на основі інверсної моделі і комплексу ПІ-регуляторів.

Дослідження динамічних властивостей мехатронної системи мікроклімату салону автомобіля із запропонованими засобами управління проводилося на основі комп'ютерного моделювання. Результати аналізу роботи комп'ютерної моделі показали, що програма розрізняє статичні і динамічні властивості реального об'єкту.

Досліджувана система управління станом мультизонного повітряного середовища в салоні автомобіля має 4 камери змішувачів і 18 зон регулювання, що мають відношення до водія і пасажирів. Передусім, виконано аналіз властивостей скоректованого об'єкту, що є комбінацією об'єкту управління з блоком корекції. Результати обчислювальних експериментів з комп'ютерною моделлю скоректованого об'єкту управління показують, що при поданні на його входи ступінчастих задаючих дій $AFR_{1,6}, \dots, AFR_{18,6}$, що дорівнюють 1 в початковий момент часу і 2, починаючи з 2с. Поведінка підсистеми в розімкненому стані характеризується плавними перехідними процесами (рис. 6).

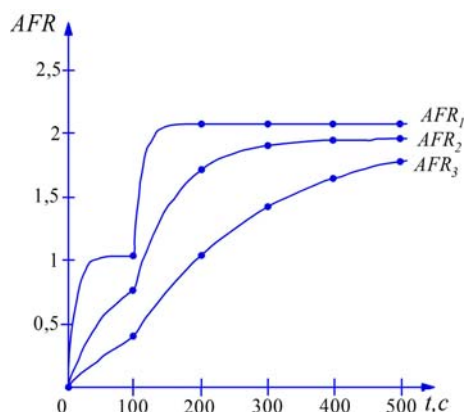


Рисунок 6 - Процеси регулювання показників комфорту мехатронної системи мікроклімату салону автомобіля в розімкненій підсистемі, що містить об'єкт управління і блок корекції
Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що взаємовплив каналів в скоректованому об'єкті управління є незначним. Завдяки дії блоку корекції реакції, обумовлені перехресними зв'язками, не перевищують 1% від прикладеної ступінчастої дії. Це свідчить про ефективність розв'язки каналів системи управління, які можна вважати практично автономними. Похибки регулювання показників комфорту для усіх 18 зон в усталеному режимі складають від 2 до 11 % від бажаного значення. Проте, тривалість перехідних процесів в різних каналах сильно розрізняється та лежить в діапазоні 150...600 с і істотно перевищує допустимі значення.

Результати математичного моделювання замкнутої системи, що містить багатоканальний двохкаскадний регулятор з налагодженими ПІ-регуляторами (рис. 7) при тих же задаючих діях свідчать про скорочення часу перехідного процесу в різних каналах системи від 7,5 до 24 разів. Тривалість перехідних процесів лежить в діапазоні від 6 до 10 с, і не перевищує необхідного значення, що дорівнює 10 с.

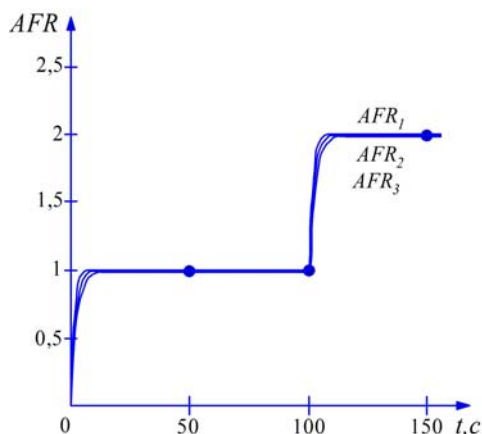


Рисунок 7 - Процеси регулювання показників комфорту мехатронної системи мікроклімату салону автомобіля в замкнутій системі з двохкаскадним регулятором

Джерело: розроблено авторами

Завдяки дії інтегральних складових Пі-регуляторів погрішності відтворення показників комфорту в усталеному режимі за відсутності збурюючої дії виявилися практично рівними нулю. При дії сонячної радіації вони не перевищують 0,5%. Це свідчить про високу ефективність пропонуваного засобу управління і підвищення ефективності функціонування мехатронної системи мікроклімату салону автомобіля.

Висновки.

1. Розроблено мехатронний підхід замикання систем за показниками комфорту і використання в регуляторі інверсної статичної моделі нелінійного об'єкту управління і комплексу пропорційно-інтегральних регуляторів, що дає можливість підвищити точність і швидкодію систем управління кліматичним комфортом мультizonного робочого простору салону автомобіля.

2. Запропоновано структуру мехатронної системи управління з комп'ютерним багатоканальним двохкаскадним регулятором на основі нелінійних статичних інверсних моделей об'єкту управління, що сприяє істотному підвищенню точності і швидкості протікання процесів управління комфортом мультizonного робочого простору салону автомобіля та послабленню прояву ефектів нелінійності і перехресних зв'язків.

3. Підвищено якість функціонування системи управління за рахунок застосування показників кліматичного комфорту, які враховують сукупний вплив на кліматичний комфорт в мультizonному робочому просторі: різновиди температури і швидкості руху повітряних потоків в контрольованих зонах, фізіологічні особливості людини.

4. Розроблено комп'ютерну модель яка є ефективним засобом дослідження динамічних властивостей мехатронних систем управління кліматичним комфортом в мультizonному робочому просторі.

5. Запропоновано принципи доцільного формування багатоканального регулятора системи на основі інверсних моделей, що враховують статичні властивості нелінійного об'єкту управління та підвищують точність, швидкодію і узгодженість реакцій каналів системи управління кліматичним комфортом салону автомобіля.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. та ін. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В. Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочиснення автомобіля. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип.

- 7(38). Ч.1. С. 167-176.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Розробка математичної моделі мехатронного модуля системи рульового управління вантажних автомобілів. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: матеріали конф. V Міжнар. наук.-практ. конф., 19-21 квіт. 2023 р., м. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С. 9-11.*
 4. Войчишин Ю.І., Круць Т.І., Зінько Р.В., Горбай О.З. Дослідження мікроклімату салону міського автобуса. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2020. №1(14). С. 49-57.*
 5. Лук'яненко В.М., Галич І.В. Аналіз вимог до мікроклімату на робочому місці оператора мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенка. 2010. Т. 2, Вип. 93. С. 232-247.*
 6. Куліков Ю.А., Грибніченко М. В., Гончаров А. В. Системи охолодження, вентиляції та опалення автомобілів: монографія. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2006. 241 с.
 7. Nishant Agarwall, Ekhlak Khan. Automobile Air Conditioning System. *International Research Journal of Engeneering and Technology (IRJET)*, 05 Issue 06 June, 2018. P. 2121-2125.
 8. Rați S., Laza I., Alexa V., Cioată V. Practical studies on car air conditioning systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 393 (1):012073, 2018. 6 p.
 9. Terry J. Hendricks. Optimization of vehicle air conditioning systems using transient air conditioning performance analysis. National Renewable Energy Laboratory. Copyright 2001 Society of Autmotive Engeneers, 2001. 10 p.
 10. Şaban Ünal. An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Yildiz Technical University Press, 2017. P.1089-1101.*

References

1. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Hryn'kiv, A.V. et al. (2017). Metodolohichni i teoretychni osnovy zabezpechennia ta pidvyschennia nadijnosti funktsionuvannia avtomobil'nykh transportnykh system [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems]. Kropyvnyts'kyj: Vydavnytstvo TOV "KOD" [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2023). Obgruntuvannia mekhanizmu funktsionuvannia mekhatronnoi systemy skloochyschennia avtomobilia [Justification of the mechanism of operation of the mechatronic system of car windshield cleaning]. *Tsentr'al'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, 7(38), 1, 167-176* [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Zamurenko, A.S. (2023). Rozrobka matematychnoi modeli mekhatronnoho modulia systemy rul'ovoho upravlinnia vantazhnykh avtomobiliv [Development of a mathematical model of the mechatronic module of the truck steering system]. Increasing the reliability and efficiency of machines, processes and systems: *V Mizhnar. nauk.-prakt. konf.(19-21 kvit. 2023 r.) - V International science and practice conf. (pp. 9-11)*. Kropyvnyts'kyj: TsNTU [in Ukrainian].
4. Vojchyshyn, Yu.I., Kruts', T.I., Zin'ko, R.V. & Horba, O.Z. (2020). Doslidzhennia mikroklimatu salonu mis'kohoho avtobusa [Study of the microclimate of the interior of a city bus]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti - Modern technologies in mechanical engineering and transport, 1(14), 49-57* [in Ukrainian].
5. Luk'ianenko, V.M. & Halyc, I.V. (2010). Analiz vymoh do mikroklimatu na robochomu mistsi operatora mobil'noi sil'skohospodars'koi tekhniky [Analysis of microclimate requirements at the workplace of the operator of mobile agricultural machinery]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skohoho hospodarstva im. P. Vasylenka - Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko, 2, 93, 232-247* [in Ukrainian].
6. Kulikov, Yu.A., Hrybinichenko, M. V. & Honcharov, A. V. (2006). *Systemy okholodzhennia, ventyliatsii ta opalennia avtomobiliv [Systems of cooling, ventilation and heating of cars]*. Luhans'k: SNU im. V. Dalia [in Ukrainian].
7. Nishant Agarwall, Ekhlak Khan (2018). Automobile Air Conditioning System. *International Research Journal of Engeneering and Technology (IRJET)*, 05 Issue 06 June. P. 2121-2125.
8. Rați, S., Laza I., Alexa, V., Cioată V. (2018) Practical studies on car air conditioning systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 393 (1):012073. 6 p.
9. Terry J. Hendricks (2001). Optimization of vehicle air conditioning systems using transient air conditioning performance analysis. National Renewable Energy Laboratory. Copyright 2001 Society of Autmotive Engeneers. 10 p.
10. Şaban Ünal (2017). An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Yildiz Technical University Press. P.1089-1101.*

Holub Dmytro, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Aulin Viktor**, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mathematical model of improving the quality of control of the mechatronic system of the car interior microclimate

An analysis of studies of microclimate control systems in the car interior was carried out and the requirements for climatic comfort of the space surrounding a person during the operation of the vehicle were formulated. The necessity of forming a climate comfort control system as a mechatronic system of a car, which has increased speed, consistency and accuracy of adjusting the values for its determination, is substantiated.

A list of indicators is proposed that most accurately take into account the cumulative effect on climatic comfort in a multi-zone working space and allow to improve the quality of functioning of the mechatronic microclimate control system of the car interior.

A mathematical model for improving the quality of control of the mechatronic system of the car interior microclimate has been developed. The model describes a multidimensional nonlinear electropneumomechanical control object and its structure.

The dynamic properties of digital tracking drives based on direct current collector motors, which are part of the executive part of the mechatronic system for controlling the climate comfort of the car interior, were studied.

An algorithm for implementing the model in the Matlab Simulink environment has been developed, which allows for detailed computer modeling of the control processes of the mechatronic climate comfort system in order to increase its accuracy and speed.

The principles of forming a multi-channel regulator of a mechatronic system based on inverse models are proposed. These principles reflect the static properties of the non-linear control object and increase the coherence of the reactions of the channels of the car interior microclimate control system.

mechatronic system, modeling, microclimate, car interior, automatic control, regulator, digital tracking drive

Одержано (Received) 12.04.2024

Прорецензовано (Reviewed) 24.05.2024

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024

УДК 621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.78-87](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.78-87)

А.Б. Гупка¹, доц., канд. техн. наук, **В.В. Аулін²**, проф., д-р техн. наук, **В.З. Гудь¹**, проф., д-р техн. наук, **І.Г. Ткаченко¹**, доц., канд. техн. наук, **Л.М. Слободян¹**, доц., канд. техн. наук, **Д.В. Міронов¹**, доц., канд. техн. наук

¹*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

²*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

e-mail : Gupkab@gmail.com

Дослідження впливу змінного електромагнітного поля на трибологічні властивості моторних олиव

Проаналізовано основні причини зниження експлуатаційної надійності двигунів автомобілів під час пуску. Систематизовано фактори які впливають на появу задирів на робочих поверхнях деталей трибоспряджень, характер їх зношування. Запропонована конструкція оливозакачуючого пристрою для обробки моторних олив змінним електромагнітним полем з метою покращення їх експлуатаційних властивостей. Проведено комплекс досліджень по впливу змінного електромагнітного поля на в'язкісно-температурні характеристики моторних олив.

двигун, знос, задир, моторна олива, змінне електромагнітне поле

Постановка проблеми. Однією із основних проблем автомобілебудування є підвищення експлуатаційної надійності та технічного рівня автомобілів, забезпечення

© А.Б. Гупка, В.В. Аулін, В.З. Гудь, І.Г. Ткаченко, Л.М. Слободян, Д.В. Міронов, 2024