

В. О. Ковтун

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
[viacheslav.o.kovtun@lpnu.ua](mailto:viacheslav.o.kovtun@lpnu.ua)

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ОБІГРІВУ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ – ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

<https://doi.org/>

© Ковтун В., 2024

Досліджено задачу підвищення енергоефективності системи обігріву, вентиляції та кондиціонування (ОВК) повітря для електромобіля. Через відсутність двигуна внутрішнього згоряння в електромобілях немає додаткового джерела тепла, тому системи ОВК споживають значну частку енергії від акумуляторів, що суттєво зменшує запас ходу. Метою є розробка енергоефективного алгоритму керування системою ОВК, який мінімізує енергоспоживання під час забезпечення належного рівня комфорту для пасажирів. Для вирішення цієї задачі була розроблена комплексна математична модель системи ОВК, що містить модель середовища, модель системи вентиляції, випаровувача, нагрівача та рециркуляції повітря. У межах дослідження було виконано моделювання температурних, вологісних параметрів і концентрації CO<sub>2</sub> у салоні електромобіля.

Комп’ютерне моделювання, проведене в середовищі Matlab/Simulink, дало змогу детально проаналізувати динамічні та статичні характеристики запропонованої системи. Порівняння з базовою системою, що використовувала лише зовнішнє повітря для контролю мікроклімату, проводилося за постійних умов: відносна вологість зовнішнього повітря – 100 %, концентрація CO<sub>2</sub> – 400 ppm, температура всередині салону – 22 °С, виділення вологи та CO<sub>2</sub> пасажирами – 100 г/год та 20 г/год відповідно. Моделювання показало, що запропонована система керування забезпечує значне зниження енергоспоживання, порівняно з базовою системою, – на 10–40 % залежно від зовнішніх температур. За температури навколишнього середовища – 25 °С було досягнуто зниження енергоспоживання на 46,2 %, а за 25 °С – на 12,1 %.

Покращення енергоефективності досягається завдяки оптимізації рециркуляції повітря, керуванню продуктивністю вентиляції, випаровувача та нагрівача. Запропонована система підтримує комфортні умови для пасажирів, запобігаючи конденсації вологи на склі та стабілізуючи рівень CO<sub>2</sub> у салоні. Отже, вона сприяє не лише підвищенню комфорту, а й зниженню витрат енергії.

Отримані результати підтверджують можливість суттєвого зниження енергоспоживання без шкоди для комфортних умов. Подальші дослідження можуть бути

**спрямовані на вдосконалення інтелектуальних алгоритмів управління та впровадження методів прогнозування для подальшого зменшення витрат енергії системи ОВК в умовах експлуатації електромобіля в різних кліматичних умовах.**

**Ключові слова:** електромобіль, система обігріву, система вентиляції та кондиціонування, енергоефективність, математичне моделювання, алгоритм керування, рециркуляція повітря.

### **Вступ**

Під час користування транспортним засобом водій і пасажир у процесі дихання виділяють у салон вологу та вуглекислий газ. Якщо не підтримувати оптимальний рівень вологості, на склі може конденсуватися надлишкова волога [1]. Підвищений вміст вуглекислого газу негативно впливає на самопочуття водія і пасажирів [2, 3], а конденсат на склі погіршує видимість. Тому підтримання оптимального рівня вологості та концентрації вуглекислого газу системою обігріву, вентиляції та кондиціонування (ОВК) повітря є важливим завданням, оскільки воно підвищує безпеку руху та комфорт пасажирів.

За допомогою системи ОВК в салон надходить свіже повітря, яке витісняє вже наявне. Цей обмін забезпечує постійний рух повітря, сприяючи видаленню надлишкової вологи та вуглекислого газу. Для комфорту водія і пасажирів важливо також підтримувати оптимальну температуру повітря в салоні [4–6]. Однак надмірний обмін повітря між салоном електромобіля і навколишнім середовищем може спричинити значні вентиляційні втрати, що знижує ефективність системи і підвищує енергоспоживання. Енергоспоживання системи ОВК є важливим фактором для електромобілів, порівняно із автомобілями на ДВЗ, оскільки мають суттєвий вплив на запас ходу. Тому оптимальний рівень вентиляції дає змогу мінімізувати втрати, одночасно підтримуючи високу якість повітря в салоні.

### **Огляд літератури**

У сучасних дослідженнях електромобільних ОВК-систем існує багато рішень, спрямованих на зменшення енергоспоживання. Одним із таких підходів є використання енергоефективних технологій, таких як теплові насоси, які можуть значно підвищити ефективність системи опалення та охолодження. Теплові насоси дають змогу використовувати теплову енергію з навколишнього середовища для підтримки комфортної температури в салоні електромобіля. Дослідники також розглядають різні методи покращення ефективності теплових насосів, наприклад, через удосконалення конструкції [7] або керування [8]. Інший напрям передбачає використання фазозмінних матеріалів для акумулювання відпрацьованого тепла [9, 10]. Ці матеріали можуть накопичувати енергію під час фазових переходів і забезпечувати її поступове виділення, що знижує навантаження на систему кондиціонування. Аналогічно адсорбери використовуються для зберігання вологи або CO<sub>2</sub>, що дає змогу регулювати рівень цих параметрів без значних енергетичних затрат [11].

Крім того, велика увага приділяється прогнозуванню комфортних параметрів мікроклімату всередині електромобіля залежно від погодних умов, тривалості поїздки, кількості пасажирів та інших факторів [4–6]. Встановлення таких залежностей допомагає розробляти алгоритми для динамічної адаптації ОВК-системи до змін середовища, що дає змогу підвищити комфорт.

Однак, незважаючи на значний прогрес у технологіях, стратегія керування ОВК-системою залишається недооціненою темою в наукових публікаціях. Збільшення ефективності окремих компонентів системи чи застосування передових технологій не гарантує загальної енергоефективності без оптимізованої стратегії керування. Саме керування всією системою є ключовим фактором, що визначає ефективність, оскільки навіть найкращі окремі рішення можуть не дати очікуваного результату, якщо не інтегровані в оптимальний алгоритм керування.

Сучасні алгоритми, що базуються на нечіткій логіці [12, 13] або складних методах узагальненого диз'юнктивного програмування (GDP) [14], мають суттєві недоліки, оскільки часто

базуються на експертних оцінках і не мають чіткої стратегії. Замість цього доцільніше використовувати більш прості та зрозумілі алгоритми, що базуються на фундаментальних законах фізики та термодинаміки. Це дасть змогу забезпечити не лише стабільність роботи, а й передбачуваність результатів. Особливо варто зазначити, що більшість наявних рішень охоплюють лише часткові аспекти керування системою ОВК. Також є рішення, які використовують дискретні методи підтримання рівня CO<sub>2</sub> [2, 3], тоді як можливість безперервного регулювання цього показника дає змогу досягати кращих результатів.

Тому комплексне розуміння фізичних процесів у системі ОВК та їх математичне моделювання є визначальним для розробки ефективних алгоритмів керування системою загалом.

### **Мета статті**

Мета статті – розробка енергоефективного алгоритму керування системою ОВК для електромобіля, що дасть змогу зменшити енергоспоживання без шкоди для комфортних умов у салоні. У межах дослідження передбачено досягнення таких цілей: забезпечення стабільного контролю температури, вологості та вмісту CO<sub>2</sub> у салоні за різних зовнішніх умов; оптимізація роботи компонентів системи HVAC, зокрема вентилятора, випаровувача, нагрівача та вузла рециркуляції; мінімізація теплових втрат і забезпечення максимального енергозбереження.

Досягнення поставлених цілей передбачає математичне і комп'ютерне моделювання процесів, які є в системі кліматизації салону електромобіля, та дослідження ефективності запропонованого алгоритму керування шляхом симулювання в середовищі Matlab/Simulink. Основною задачею є порівняння ефективності нового алгоритму, порівняно з базовою системою, яка використовує тільки зовнішнє повітря для контролю мікроклімату.

### **Загальний огляд системи**

Система керування кліматом у салоні електромобіля складається з декількох основних компонентів, які взаємодіють між собою для підтримання комфортних умов для водія і пасажирів. Основна мета системи – забезпечити оптимальний рівень температури, вологості та вмісту вуглекислого газу в повітрі, що циркулює у салоні. Для досягнення цієї мети було розроблено математичну модель у середовищі Simulink, яка дала змогу створити і перевірити систему керування.

#### **Основні складові системи:**

##### **1.1. Модель повітря в салоні**

Ця складова моделює параметри повітря, такі як температура, вологовміст і вміст вуглекислого газу. Вказані параметри є критичними для визначення комфортності умов у салоні. Модель враховує вплив зовнішніх факторів і змінні умови всередині салону.

##### **1.2. Модель системи ОВК**

До складу цієї моделі входять вентилятор, вузол змішування повітря (зовнішнього і внутрішнього), випаровувач та нагрівач. Кожен з цих компонентів виконує специфічну функцію: вентилятор забезпечує циркуляцію повітря, вузол змішування регулює співвідношення продуктивності потоків між повітрям із салону і зовнішнім повітрям, випаровувач охолоджує і осушує повітря, а нагрівач підвищує його температуру, коли це необхідно.

##### **1.3. Модель системи керування**

Система керування відповідає за обробку даних, отриманих з датчиків, і формування сигналів керування виконавчими елементами для підтримання оптимальних умов у салоні. Вона контролює роботу вентилятора, вузла змішування, випаровувача і нагрівача, керуючи ними відповідно до встановлених алгоритмів для досягнення бажаних параметрів температури, вологості та вмісту CO<sub>2</sub>.

##### **1.1. Модель повітря в салоні**

Модель повітря відіграє ключову роль у створенні математичної моделі мікроклімату всередині салону електромобіля. Вона дає змогу розрахувати основні параметри, такі як

температура, вологовміст і концентрація вуглекислого газу. Ці параметри необхідні для оцінки ефективності роботи системи керування кліматом, оскільки вони забезпечують можливість динамічного відстежування поведінки системи та оцінки її точності, стійкості й швидкодії, а також реакції на зміни внутрішніх, зовнішніх і заданих умов.

**Модель вмісту вуглекислого газу.** Для розрахунку вмісту вуглекислого газу спочатку необхідно визначити густину повітря в салоні. Залежність густини повітря від температури і тиску визначається за допомогою рівняння ідеального газу [15]:

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{p_{\text{пов}} \cdot M_{\text{пов}}}{R \cdot (T_{\text{пов}} + 273,15)}, \quad (1)$$

де  $\rho_{\text{пов}}$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $p_{\text{пов}}$  – абсолютний тиск повітря, Па;  $M_{\text{пов}} = 0,02897$  кг/моль – молярна маса повітря;  $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – універсальна газова стала;  $T_{\text{пов}}$  – температура повітря, °С.

Модель вмісту CO<sub>2</sub> в салоні базується на принципі балансу маси [16]:

$$\frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} = E_{\text{CO}_2} + G \cdot \text{CO}_{2\text{вх}} - G \cdot \text{CO}_{2\text{вн}}, \quad (2)$$

де  $m_{\text{CO}_2}$  – маса вуглекислого газу в салоні, г;  $E_{\text{CO}_2}$  – кількість вуглекислого газу, яку виділяють пасажери, г/с;  $G$  – продуктивність повітря, яку створює система кондиціонування, кг/с;  $\text{CO}_{2\text{вх}}$  – вміст вуглекислого газу в повітрі, яке подається системою кондиціонування, г/кг;  $\text{CO}_{2\text{вн}}$  – вміст вуглекислого газу в салоні, г/кг.

Для визначення вмісту вуглекислого газу використовується таке рівняння [15]:

$$\text{CO}_{2\text{вн}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{пов}} \cdot V}, \quad (3)$$

де  $V$  – об'єм салону.

**Модель вмісту вологи.** Залежно від температури в 1 кг повітря може вміститись певна кількість вологи. Зв'язок між максимальним вологовмістом повітря та його температурою описується такою залежністю [16]:

$$AH_{\text{max}} = \frac{e_0 \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{пов}} \cdot M_{\text{пов}}} \cdot \exp\left(\frac{T_{\text{пов}} \cdot 17,67}{T_{\text{пов}} + 243,5}\right), \quad (4)$$

де  $AH_{\text{max}}$  – максимальний вологовміст повітря, г/кг;  $e_0 = 611,2$  Па – насичений парціальний тиск водяної пари за температури 0 °С;  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,01528$  г/моль – молярна маса водяної пари.

Поточний вологовміст повітря можна визначити за допомогою відносної вологості так [16]:

$$AH = \frac{RH}{100} \cdot AH_{\text{max}}, \quad (5)$$

де  $AH$  – абсолютна вологість повітря, г/кг;  $RH$  – відносна вологість повітря, %.

Отже, на основі інформації про температуру і відносну вологість можна визначити абсолютну вологість повітря.

Модель вмісту вологи в салоні також базується на принципі балансу маси [16]:

$$\frac{dm_{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = E_{\text{H}_2\text{O}} + G \cdot AH_{\text{вх}} - G \cdot AH_{\text{вн}}, \quad (6)$$

де  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – маса вологи в салоні, г;  $E_{\text{H}_2\text{O}}$  – кількість вологи, яку виділяють пасажери, г/с;  $AH_{\text{вх}}$  – вміст вологи в повітрі, яке подається системою кондиціонування, г/кг;  $AH_{\text{вн}}$  – вміст вологи в салоні, г/кг.

Для визначення вмісту вологи використовується таке рівняння [15]:

$$AH_{\text{вн}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{пов}} \cdot V}. \quad (7)$$

Якщо вміст вологи в салоні досягає значення  $AH_{\text{max}}$ , тобто відносна вологість становить 100 %, а виділення вологи при цьому продовжується, надлишок вологи інтегрується у вигляді конденсату.

**Теплова модель повітря.** Для визначення температури повітря в салоні електромобіля використовується принцип балансу потужностей, а температура повітря описується таким диференціальним

рівнянням [15]:

$$\frac{dT_{\text{ВН}}}{dt} = \frac{G \cdot c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВН}}) - \Delta P}{c_{\text{пов}} \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot V}, \quad (8)$$

де  $T_{\text{ВН}}$  – температура повітря в салоні, °С;  $T_{\text{ВХ}}$  – температура повітря, яке подається системою кондиціонування, °С;  $\Delta P$  – тепловіддача в навколишнє середовище з врахуванням знака, Вт;  $c_{\text{пов}}$  – теплоємність повітря,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ .

Загалом теплообмін із зовнішнім середовищем здійснюється через кузов електромобіля та внутрішній і зовнішній конвективний теплообмін [18]. Теплообмін із навколишнім середовищем визначається на основі еквівалентних опорів теплопередачі і описується такою залежністю [17]:

$$\Delta P = \frac{T_{\text{ЗОВ}} - T_{\text{ВН}}}{R_{T_{\text{КУЗ}}} + R_{T_{\text{К.З}}} + R_{T_{\text{К.В}}}}, \quad (9)$$

де  $T_{\text{ЗОВ}}$  – температура зовнішнього повітря, °С;  $R_{T_{\text{КУЗ}}}$  – сумарний еквівалентний опір теплопередачі кузова, К/Вт;  $R_{T_{\text{К.З}}}$  та  $R_{T_{\text{К.В}}}$  – опори зовнішньої та внутрішньої конвективної теплопередачі, К/Вт.

Конвективна теплопередача розраховується на основі критерію Нуссельта для турбулентних потоків, враховуючи число Рейнольдса та Прандтля, і в розгорнутому вигляді описується такою залежністю [17]:

$$R_{T_{\text{КОНВ}}} = \frac{L_{\text{П}}}{A_{\text{П}} \cdot \lambda_{\text{пов}} \cdot 0,332} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{пов}}}{v_{\text{пов}} \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot L_{\text{П}}} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\mu_{\text{пов}} \cdot c_{\text{пов}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

де  $R_{T_{\text{КОНВ}}}$  – опір конвективної теплопередачі, К/Вт;  $L_{\text{П}}$  – довжина поверхні вздовж набігаючого потоку, м;  $A_{\text{П}}$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{пов}}$  – теплопровідність повітря,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ ;  $\mu_{\text{пов}}$  – динамічна в'язкість повітря, Па·с;  $v_{\text{пов}}$  – швидкість повітряного потоку, м/с.

### 1.2. Модель системи ОВК

**Модель роботи вентилятора** з його низькорівневою системою керування загалом можна описати диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_3 - G}{\tau}, \quad (11)$$

де  $G_3$  – задане значення продуктивності вентилятора, кг/с;  $\tau$  – стала часу системи.

**Модель вузла змішування.** Вузол змішування за допомогою заслінки рециркуляції змінює співвідношення між кількістю повітря, яке забирається з вулиці, та кількістю, яка циркулює всередині салону. Система низькорівневого керування заслінкою змішування має, залежно від продуктивності вентилятора, регулювати її положення так, щоб забезпечувати задане співвідношення між продуктивністю рециркуляції та сумарною продуктивністю. Продуктивність рециркуляції в такому випадку буде визначатись так:

$$G_{\text{реци}} = G \cdot k_{\text{реци}}, \quad (12)$$

де  $G_{\text{реци}}$  – продуктивність рециркуляції повітря, кг/с;  $k_{\text{реци}}$  – коефіцієнт рециркуляції.

Враховуючи це, продуктивність притоку буде описуватись такою залежністю:

$$G_{\text{прит}} = G - G_{\text{реци}}, \quad (13)$$

де  $G_{\text{прит}}$  – продуктивність притоку повітря ззовні, кг/с.

У процесі змішування потоків на виході отримується суміш з іншими температурою, вмістом вуглекислого газу та вологості, порівняно із потоками рециркуляції та притоку. Результуючі параметри повітряної суміші визначаються на основі таких залежностей:

$$CO_{2\text{сум}} = CO_{2\text{ЗОВ}} + k_{\text{реци}}(CO_{2\text{ВН}} - CO_{2\text{ЗОВ}}), \quad (14)$$

де  $CO_{2\text{ВН}}$  – вміст вуглекислого газу в суміші, г/кг;  $CO_{2\text{ЗОВ}}$  – вміст вуглекислого газу навколишньому середовищі;

$$AH_{\text{сум}} = AH_{\text{ЗОВ}} + k_{\text{реци}}(AH_{\text{ВН}} - AH_{\text{ЗОВ}}), \quad (15)$$

де  $AH_{\text{сум}}$  – абсолютна вологість суміші, г/кг;  $AH_{\text{зов}}$  – абсолютна вологість повітря в навколишньому середовищі, г/кг;

$$T_{\text{сум}} = T_{\text{зов}} + k_{\text{рец}}(T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}}), \quad (16)$$

де  $T_{\text{сум}}$  – температура суміші, °С;  $T_{\text{зов}}$  – температура навколишнього середовища, °С.

**Модель випаровувача.** Завдяки процесу випаровування холодоагенту відбувається поглинання тепла і, відповідно, зниження температури. За достатньо високої температури навколишнього середовища це допомагає підтримувати оптимальну температуру. Також зниження температури сприяє видаленню вологи із повітря шляхом її конденсації. Система низькорівневого керування компресором кондиціонера має регулювати продуктивність і тиск, який він створює, щоб забезпечити необхідну температуру випаровувача. Повітряна суміш із вузла змішування під час проходження через випаровувач буде змінювати параметри вологості та температури. Для визначення фактичної температури повітря після випаровувача використовується такий вираз:

$$T_{\text{вип}} = \min(T_{\text{сум}}, T_{\text{вип.з}}), \quad (17)$$

де  $T_{\text{вип}}$  – температури повітря після випаровувача, °С;  $T_{\text{вип.з}}$  – задане значення температури повітря після випаровувача, °С.

Для визначення фактичного вологовмісту повітря на виході із системи кондиціонування використовується такий вираз:

$$AH_{\text{вх}} = \min(AH_{\text{сум}}, AH_{\text{max}}(T_{\text{вип}})), \quad (18)$$

де  $AH_{\text{max}}(T_{\text{вип}})$  – максимальний вологовміст повітря під час його охолодження до температури випаровувача ( $T_{\text{вип}}$ ), г/кг.

Теплопродуктивність випаровувача описується такою залежністю [15]:

$$P_{\text{вип}} = G \cdot (q \cdot (AH_{\text{сум}} - AH_{\text{вх}}) + c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{сум}} - T_{\text{вип}})), \quad (19)$$

де  $P_{\text{вип}}$  – теплопродуктивність випаровувача, Вт;  $q$  – кількість необхідної енергії для конденсації вологи, Дж/г.

**Модель нагрівача.** Для підтримання необхідної температури в салоні використовується нагрівач. Його низькорівнева система керування регулює напругу живлення так, щоб підтримувати задану потужність.

Залежність вихідної температури від потужності нагрівача описується такою залежністю [17]:

$$T_{\text{вх}} = T_{\text{вип}} + \frac{P_{\text{наг}}}{G \cdot c_{\text{пов}}}, \quad (20)$$

де  $P_{\text{наг}}$  – теплова потужність нагрівача, Вт.

#### 4.3. Модель системи керування мікрокліматом в салоні електромобіля

Система керування відповідає за моніторинг і регулювання параметрів мікроклімату в салоні електромобіля, таких як температура, вологовміст і концентрація  $\text{CO}_2$ . Вона забезпечує оптимальний комфорт для пасажирів, автоматично підлаштовуючи роботу системи кондиціонування відповідно до змін внутрішніх та зовнішніх умов. Система керування складається з кількох підсистем, кожна з яких відповідає за контроль конкретного параметра: температури, вологості, вмісту вуглекислого газу, продуктивності повітря.

**Система контролю температури** складається із таких ключових блоків: естиматор теплообміну, контроль нагрівання, контроль охолодження, обмеження потужності нагріву та охолодження.

Система підтримання температури базується на принципі балансу потужностей, тобто необхідно компенсувати теплообмін із навколишнім середовищем. Основними складовими теплообміну із навколишнім середовищем є теплообмін випромінюванням та конвекцією, відведення тепла у процесі осушування повітря, а також теплообмін, спричинений вентиляцією.

Складова потужності теплообміну, яка спричинена вентиляцією, враховуючи вирази (12), (13) та (16), визначається так:

$$\Delta P_{\text{вент}} = G \cdot c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{сум}}), \quad (21)$$

де  $\Delta P_{\text{вент}}$  – теплообмін, спричинений вентиляцією, Вт.

Складова потужності теплообміну, яка спричинена роботою випаровувача у процесі осушування повітря, визначається так:

$$\Delta P_{\text{осуш}} = G \cdot c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{сум}} - T_{\text{вип}}), \quad (22)$$

де  $\Delta P_{\text{осуш}}$  – теплообмін спричинений осушуванням повітря, Вт.

Потужність, необхідна для того, щоб перевести систему в стан із заданою температурою, визначається так:

$$\Delta P_{\text{дод}} = G \cdot c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{зад}} - T_{\text{вн}}), \quad (23)$$

де  $\Delta P_{\text{дод}}$  – додаткова потужність, Вт.

Складову потужності теплообміну випромінюванням та конвекцією можна обчислити, використовуючи вираз (8):

$$\Delta P = \left( G \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вн}}) - \frac{dT_{\text{вн}}}{dt} \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot V \right) \cdot c_{\text{пов}}. \quad (24)$$

Для покращення динамічних властивостей системи регулювання температури можна додати складову, спричинену похибкою регулювання:

$$\Delta P_{\text{проп}} = K_p \cdot (T_{\text{зад}} - T_{\text{вн}}), \quad (25)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт підсилення регулятора.

*Контроль нагрівання.* Із вищеописаних залежностей (21)–(25), використовуючи принцип балансу потужності, отримано вираз для визначення необхідної потужності нагрівача:

$$P_{\text{наг}} = \Delta P_{\text{вент}} + \Delta P_{\text{осуш}} + \Delta P_{\text{дод}} + \Delta P + \Delta P_{\text{проп}}. \quad (26)$$

Для зниження шуму від системи, покращення процесу прогріву салону та уникнення надмірно високої температури повітряного потоку можна використати критерій підтримки певного рівня температури на виході системи кондиціонування шляхом регулювання продуктивності повітря, забезпечуючи необхідну потужність нагріву. Необхідна продуктивність повітря визначається за допомогою виразу:

$$G_{\text{зад.наг}} = \frac{P_{\text{наг}}}{c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{вип}})}, \quad (27)$$

де  $G_{\text{зад.наг}}$  – необхідна продуктивність повітря, кг/с;  $T_{\text{max}}$  – максимально допустиме значення температури на виході із системи кондиціонування, °С.

Для уникнення перевищення максимального значення температури в динамічних режимах обмежується потужність нагрівача з врахуванням фактичної продуктивності. Максимальна потужність нагрівача описується такою залежністю:

$$P_{\text{наг.max}} = G \cdot c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{вип}}), \quad (28)$$

де  $P_{\text{наг.max}}$  – допустима потужність нагрівача для поточної продуктивності та температури повітря, Вт.

*Контроль охолодження.* У процесі охолодження основними складовими теплообміну із навколишнім середовищем є теплообмін випромінюванням та конвекцією, теплообмін, спричинений вентиляцією. Враховуючи це, потужність, необхідна для охолодження повітря, буде визначатись таким виразом:

$$P_{\text{ох}} = \Delta P_{\text{вент}} + \Delta P_{\text{дод}} + \Delta P, \quad (29)$$

де  $P_{\text{ох}}$  – потужність, необхідна для охолодження повітря (не враховуючи потужність процесу конденсації), Вт.

Необхідна температура випаровувача для забезпечення заданої потужності охолодження визначається такою залежністю:

$$T_{\text{вип.з.ох}} = T_{\text{сум}} + \frac{P_{\text{ох}}}{G \cdot c_{\text{пов}}}, \quad (30)$$

де  $T_{\text{вип.з.ох}}$  – задане системою контролю температури значення температури випаровувача, °С.

Для уникнення обмерзання випаровувача необхідно обмежити мінімально допустиме значення його температури на рівні приблизно 3 °С.

Необхідна продуктивність повітря для забезпечення заданої потужності охолодження визначається такою залежністю:

$$G_{\text{зад.ох}} = \frac{P_{\text{ох}}}{c_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{сум}} - T_{\text{вип}})}. \quad (31)$$

**Система контролю вмісту вуглекислого газу** базується на принципі балансу маси, тобто необхідно компенсувати виділення  $CO_2$  пасажирами. Підтримання оптимального вмісту  $CO_2$  відбувається завдяки заміщенню внутрішнього повітря певною кількістю зовнішнього.

Виділення  $CO_2$  пасажирами можна визначити естимацією, використовуючи вираз (2):

$$E_{CO_2} = \frac{dm_{CO_2}}{dt} + G \cdot (CO_{2\text{вн}} - CO_{2\text{вх}}). \quad (32)$$

Величина необхідної продуктивності притічного повітря визначається такою залежністю:

$$G_{\text{прит.зад}} = \frac{E_{CO_2}}{CO_{2\text{зад}} - CO_{2\text{зов}}}, \quad (33)$$

де  $G_{\text{прит.зад}}$  – задане системою контролю вмісту вуглекислого газу значення продуктивності притічного повітря, кг/с;  $CO_{2\text{зад}}$  – задане значення вмісту вуглекислого газу, г/кг.

Для покращення динамічних властивостей системи регулювання вмісту вуглекислого газу можна додати складову, викликану похибкою регулювання:

$$G_{\text{прит.проп}} = K_p \left( CO_{2\text{вн}} - \max(CO_{2\text{зад}}, CO_{2\text{зов}}) \right), \quad (34)$$

де  $G_{\text{прит.проп}}$  – складова від П-регулятора, кг/с.

У цьому випадку вираз для визначення продуктивності притічного повітря (33) набуде вигляду:

$$G_{\text{прит.зад}} = \frac{E_{CO_2}}{CO_{2\text{зад}} - CO_{2\text{зов}}} + G_{\text{прит.проп}}. \quad (35)$$

**Система контролю вмісту вологості.** Критерієм для визначення допустимого вмісту вологості є уникнення конденсації вологи на склі. Для цього система визначає температуру поверхні скла та визначає вологовміст, який на 10–15 % менший за точку роси за цієї температури. Сам принцип підтримання заданого рівня вологості базується на компенсації вологовиділення пасажирами шляхом конденсації надлишкової вологості на випаровувачі.

Температуру поверхні скла можна визначити безпосередньо за допомогою давача або розрахунковим шляхом на основі даних від давачів зовнішньої і внутрішньої температури та швидкості електромобіля [18]. Температура поверхні скла описуватиметься такою залежністю:

$$T_{\text{скла}} = T_{\text{вн}} - \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}}}{R_{T_{\text{скла}}} + R_{T_{\text{к.з}}} + R_{T_{\text{к.в}}}} \cdot R_{T_{\text{к.в}}}, \quad (36)$$

де  $T_{\text{скла}}$  – температура внутрішньої поверхні скла, °С;  $R_{T_{\text{скла}}}$  – опір теплопередачі скла, К/Вт.

На основі отриманого значення температури поверхні скла визначається заданий рівень абсолютної вологості в салоні:

$$AH_{\text{зад}} = \frac{RH_{\text{зад}}}{100} \cdot AH_{\text{max}}(T_{\text{скла}}), \quad (37)$$

де  $AH_{\text{зад}}$  – заданий рівень абсолютної вологості в салоні, г/кг;  $RH_{\text{зад}}$  – задане значення відносної вологості повітря біля поверхні скла, %.

Виділення вологи пасажирами можна розрахувати, використовуючи (6):

$$E_{H_2O} = \frac{dm_{H_2O}}{dt} + G \cdot (AH_{\text{вн}} - AH_{\text{вх}}). \quad (38)$$

Додаткове вологовідведення, яке необхідне для переходу системи в стан із заданою вологістю (усунення статичного відхилення), визначається так:



$$\Delta E_{H_2O} = G \cdot (AH_{\text{сум}} - AH_{\text{зад}}). \quad (39)$$

де  $\Delta E_{H_2O}$  – додаткове вологовідведення, г/с.

Сумарне вологовідведення, необхідне для підтримання заданого рівня вологості визначається так:

$$Ab_{H_2O} = E_{H_2O} + \Delta E_{H_2O}. \quad (40)$$

де  $Ab_{H_2O}$  – сумарне вологовідведення, г/с.

Задане значення вологості на виході із випаровувача визначається такою залежністю:

$$AH_{\text{вх.зад}} = AH_{\text{зад}} - \frac{Ab_{H_2O}}{G}, \quad (41)$$

де  $AH_{\text{вх.зад}}$  – заданий рівень абсолютної вологості на виході із випаровувача, г/кг.

Задане значення температури випаровувача для забезпечення необхідного вологовідведення визначається із (4) та описується такою залежністю:

$$T_{\text{вип.з.вол}} = \frac{243,5 \cdot \ln \left( AH_{\text{вх.зад}} \cdot \frac{p_{\text{пов}} \cdot M_{\text{пов}}}{e_0 \cdot M_{H_2O}} \right)}{17,67 - \ln \left( AH_{\text{вх.зад}} \cdot \frac{p_{\text{пов}} \cdot M_{\text{пов}}}{e_0 \cdot M_{H_2O}} \right)}, \quad (42)$$

де  $T_{\text{вип.з.вол}}$  – задана системою контролю вмісту вологості температура на виході із випаровувача, °С.

**Система керування випаровувачем.** На основі керуючих впливів від системи контролю вмісту вологості ( $T_{\text{вип.з.вол}}$ ) та керуючих впливів від системи контролю охолодження ( $G_{\text{зад.ох}}, P_{\text{ох}}$ ) визначається задана температура повітря після випаровувача. Вологовідведення визначається на основі продуктивності вентиляції шляхом розрахунку заданої температури повітря після випаровувача. Потужність охолодження визначається на основі температури повітря після випаровувача шляхом розрахунку заданої продуктивності вентиляції. На основі такого підходу визначаються такі значення продуктивності системи вентиляції та температури повітря після випаровувача, які забезпечують необхідне вологовідведення та потужність охолодження. Це дає змогу уникнути надлишкової конденсації зайвої вологи і знизити енергоспоживання.

Однак за певних умов максимальної продуктивності системи вентиляції може бути недостатньо для забезпечення необхідної потужності охолодження. У такому разі на основі виразу (30) визначається необхідна температура повітря після випаровувача ( $T_{\text{вип.з.ох}}$ ) для забезпечення заданої потужності охолодження. Отже, якщо  $G_{\text{зад.ох}}$  перевищує максимально допустиме значення, то  $T_{\text{вип.з}} = T_{\text{вип.з.ох}}$ , в іншому випадку  $T_{\text{вип.з}} = T_{\text{вип.з.вол}}$ . Водночас продуктивність системи вентиляції підтримується на максимальному рівні, завдяки чому мінімізується кількість надлишкової конденсації і, відповідно, енергоспоживання.

**Система керування продуктивністю та вузлом змішування.** Задана продуктивність визначається шляхом вибору максимального значення із відповідних сигналів від систем контролю нагріву та охолодження, системи контролю вмісту  $CO_2$ :

$$G_{\text{зад}} = \max(G_{\text{зад.наг}}, G_{\text{зад.ох}}, G_{\text{прит.зад}}). \quad (43)$$

Задане значення продуктивності притічного повітря визначається системою контролю вмісту  $CO_2$ .

На основі заданих значень сумарної та притічної продуктивностей визначається задане значення коефіцієнта рециркуляції для вузла змішування:

$$k_{\text{рец.зад}} = 1 - \frac{G_{\text{прит.зад}}}{G_{\text{зад}}}. \quad (44)$$

На основі залежностей (1)–(44) було створено математичну модель в середовищі Matlab/Simulink для комп'ютерного симулювання.

### Результати комп'ютерного моделювання

Комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування ОВК було проведене для оцінки її ефективності, порівняно з класичною базовою моделлю, що використовує лише зовнішнє повітря та підтримує задану температуру в салоні. Моделі порівнювалися за таких постійних умов: відносна вологість зовнішнього повітря ( $RH_{зов}$ ) становила 100 %, концентрація  $CO_2$  у зовнішньому повітрі ( $CO_{2_{зов}}$ ) – 400 ppm, внутрішня температура ( $T_{вн}$ ) підтримувалася на рівні 22 °С. Крім того, параметри виділення вологи пасажиром ( $E_{H_2O}$ ) встановлені на рівні 100 г/год, а виділення  $CO_2$  ( $E_{CO_2}$ ) – 20 г/год.

У таблиці наведено для порівняння отримані результати роботи базової та розробленої систем за різних зовнішніх температур. Для порівняння систем було використано низку критеріїв, зокрема енергоспоживання та параметри мікроклімату в салоні. Як видно, запропонована система демонструє зниження енергоспоживання  $\Delta P$  на 10–40 % залежно від температури навколишнього середовища. Особливо ефективною система виявилася за високих і низьких температур, коли теплові втрати або надлишок тепла були значними. Це досягається завдяки оптимізованому керуванню потужністю нагрівача та випаровувача, а також контролю рециркуляції повітря. Важливим результатом є те, що запропонована система дає змогу досягти зниження споживання енергії завдяки комплексному підходу до керування всіма компонентами HVAC, включаючи вентилятор, вузол змішування повітря, випаровувач і нагрівач.

### Результати роботи базової та розробленої систем за різних зовнішніх температур

$T_{зов}, ^\circ C$	Базовий варіант		Пропонований варіант		
	$CO_{2_{вн}}, ppm$	$RH_{вн}, \%$	$\Delta P, \%$	$CO_{2_{вн}}, ppm$	$RH_{вн}, \%$
40	490.2	31.2	68.7	800	91.6
35	524.9	33	60.9	800	94
30	603	36.9	47.4	800	91.7
25	944.2	54.2	12.1	800	87.5
20	609.4	84	10.4	800	84
15	840.5	79	2.2	800	79.5
10	656.9	59.3	8.6	800	66.5
5	581.4	42.11	16.9	800	53.1
0	540.1	30.2	23.9	800	43.2
-5	514.2	21.7	29.7	800	36.1
-10	496.3	15.69	34.7	800	31
-15	483.3	11.4	39.1	800	27.4
-20	473.4	8.4	42.8	800	24.9
-25	465.6	6.4	46.2	800	23.2

У таблиці також наведено результати порівняння концентрації  $CO_2$  та вологості, де запропонована система демонструє кращі показники підтримання стабільності під час значного зниження енергоспоживання.

На рис. 1 показано залежності, які відображають основні параметри системи контролю температури під час зміни режимів роботи системи, спричинених зміною температури навколишнього середовища ( $T_{зов}$ ). За температури навколишнього середовища, вищій за внутрішню температуру салону ( $T_{вн}$ ), активується випаровувач для охолодження повітря до заданої температури ( $T_{зад}$ ), що видно із від'ємного значення потужності охолодження ( $P_{ох}$ ). У разі зниження температури навколишнього середовища нижче за внутрішню вмикається нагрівач, що видно із додатного значення потужності нагріву ( $P_{наг}$ ). З подальшим зниженням температури навколишнього середовища збільшується потужність нагріву, а для підтримання постійної температури повітряного

потоків на виході вентиляційної системи збільшується продуктивність ( ) для забезпечення достатнього тепловідведення.

На рис. 2 показано залежності, які відображають основні параметри системи контролю вмісту вуглекислого газу під час зміни параметрів роботи системи, спричинених зміною кількості CO<sub>2</sub>, яку виділяють пасажирів ( ). Система підтримує вміст вуглекислого газу всередині ( ) на заданому рівні ( ) шляхом регулювання кількості зовнішнього повітря, що подається через вентиляційну систему, змінюючи коефіцієнт рециркуляції повітря ( ). Якщо цього недостатньо за поточних умов, система збільшує продуктивність вентиляції ( ).

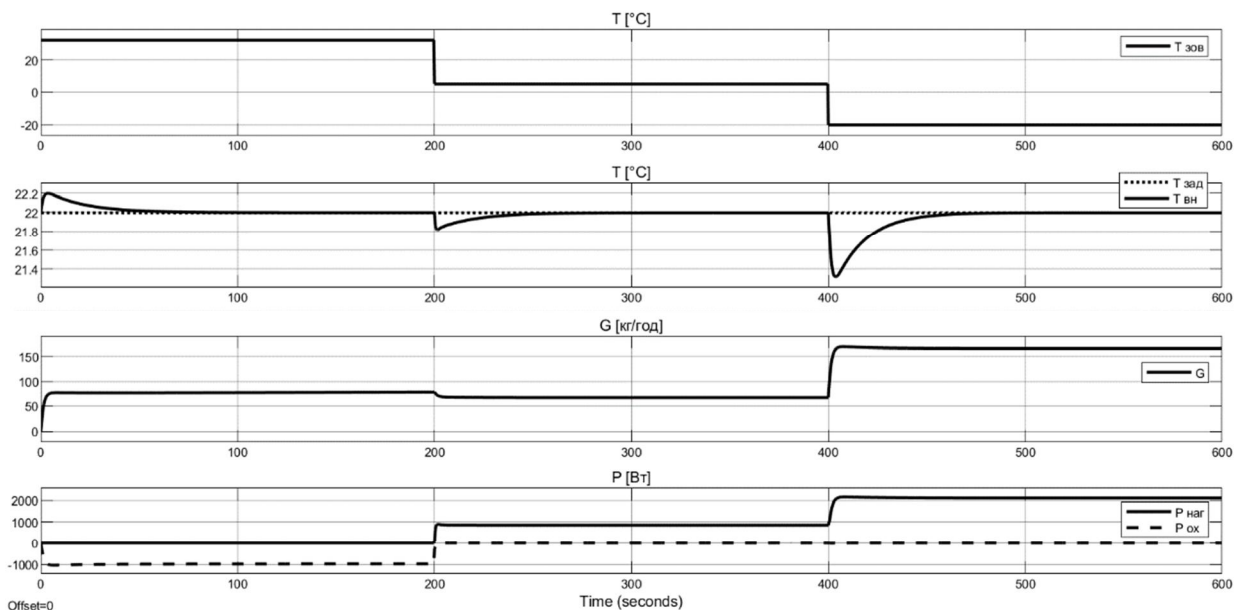


Рис. 1. Підтримання системою заданої температури під час зміни температури навколишнього середовища

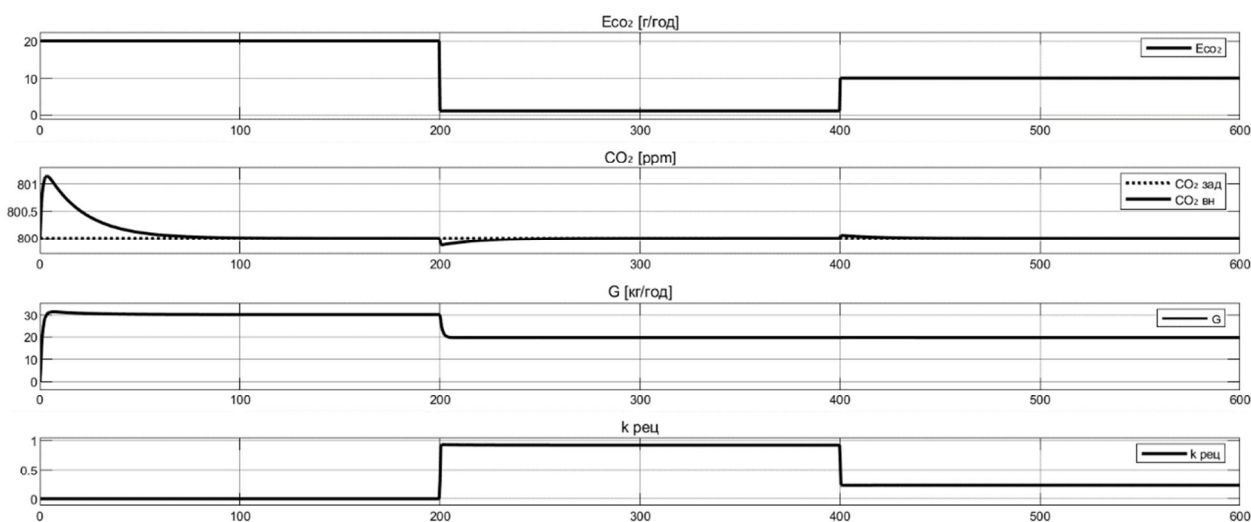


Рис. 2. Підтримання системою заданого вмісту CO<sub>2</sub> під час зміни кількості його виділення пасажирів

На рис. 3 показано залежності, які відображають основні параметри системи контролю вологості повітря під час зміни параметрів роботи системи, спричинених зміною кількості вологи, яку виділяють пасажирів ( ). Підтримання вологості всередині ( ) на заданому рівні ( )

здійснюється шляхом регулювання потужності випаровувача ( ) та продуктивності вентиляційної системи ( ). Під час збільшення вологовиділення збільшується потужність випаровувача для ефективного осушення повітря, а відповідна зміна продуктивності вентиляції пояснюється необхідністю забезпечити тепловідведення на тому ж рівні.

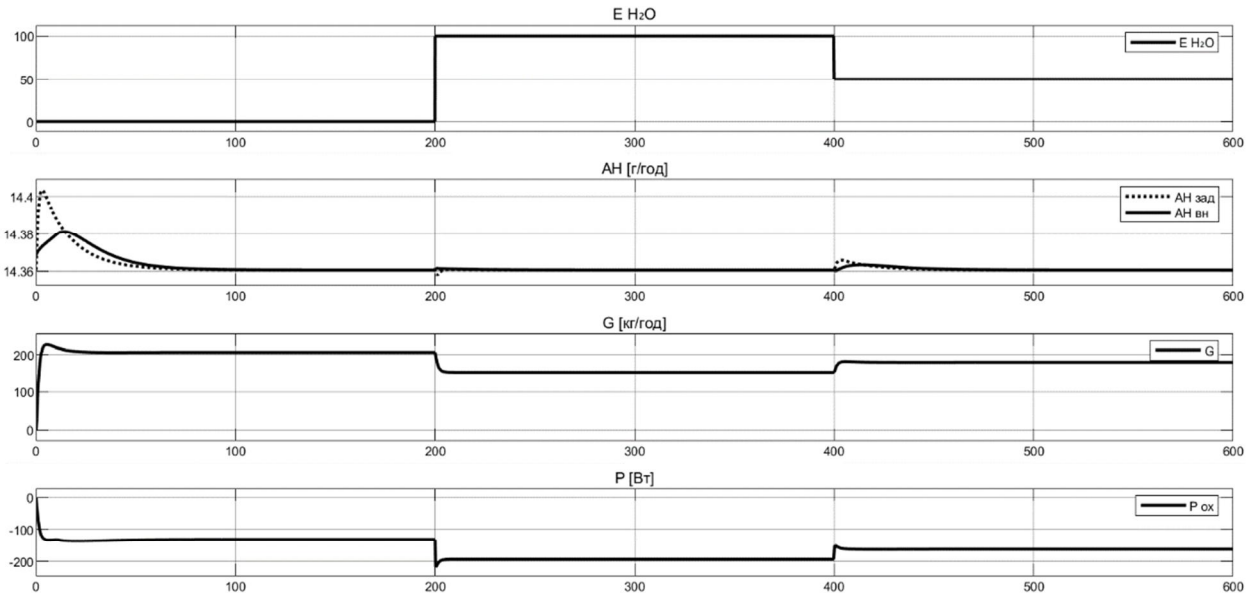


Рис. 3. Підтримання системою заданого рівня вологості під час зміни кількості її виділення пасажирами

Запропонована система показала хорошу динаміку регулювання температури, вологості та вмісту CO<sub>2</sub> (рис. 1–3), що дає змогу уникнути конденсації на склі та підтримувати високий рівень комфорту для пасажирів.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

Під час дослідження було розроблено та проаналізовано модель системи ОВК для електромобіля, яка забезпечує енергоефективне керування параметрами мікроклімату в салоні, зокрема температурою, вологістю та вмістом CO<sub>2</sub>. Порівняння з базовою системою, що використовує лише зовнішнє повітря, показало значне зниження енергоспоживання запропонованою системою (на 10–40 %) залежно від умов навколишнього середовища. Запропонована система продемонструвала стабільне підтримання заданих параметрів мікроклімату, що підвищує комфорт і безпеку для пасажирів. Основними факторами підвищення ефективності є оптимізоване керування вентиляцією, регулюванням потужності нагрівача та випаровувача, а також контроль рециркуляції повітря. Система ефективно підтримує стабільний рівень вологості та концентрації CO<sub>2</sub>, що дає змогу уникати утворення конденсату на склі та знижує навантаження на систему кондиціонування.

Проте, незважаючи на отримані результати, існують напрями для подальших досліджень. Одним із важливих аспектів є впровадження методів прогнозування мікрокліматичних параметрів у салоні на основі машинного навчання або інших інтелектуальних систем. Це дасть змогу системі ОВК не лише реагувати на зміни, а й передбачати необхідні коригування для підтримання оптимального мікроклімату за мінімального енергоспоживання. Отож подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію інтелектуальних методів керування та подальшу оптимізацію енергоефективності систем ОВК умовах реальної експлуатації електромобілів.

### Список джерел

1. Yang Y., Huang Y., Zhao J. Optimization of the automotive air conditioning strategy based on the study of dewing phenomenon and defogging progress. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 169. 114932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114932>.
2. Chang T.-B., Lin Y.-S., Hsu Y.-T. CFD simulations of effects of recirculation mode and fresh air mode on vehicle cabin indoor air quality. *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119473>.
3. Chang T.-B., Hsu Y.-T., Huang J.-W. Optimal Ventilation Strategies for Balancing Carbon Dioxide and Suspended Particulate Matter Concentrations in Vehicle Cabins. *Atmospheric Environment*. 2024. Vol. 334. 120697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120697>.
4. Alahmer A., Mayyas A., Mayyas A.A., Omar M., Shan D. Vehicular thermal comfort models; A comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. 995–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.004>.
5. Ravindra K., Agarwal N., Mor S. Assessment of thermal comfort parameters in various car models and mitigation strategies for extreme heat-health risks in the tropical climate. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 267. 110655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110655>.
6. Lan F., Chen H., Chen J., Li W. Effect of urban microclimates on dynamic thermal characteristics of a vehicle cabin. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103162>.
7. Singmai W., Onthong K., Thongtip T. Experimental Investigation of the Improvement Potential of a Heat Pump Equipped with a Two-Phase Ejector. *Energies*. 2023. Vol. 16. 5889. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16165889>.
8. Klingebiel J., Will F., Beckschulte M., Vering C., Mueller D. Data-Driven Model Predictive Control for Energy Efficient and Low-Noise Operation of Air-Source Heat Pumps. 37th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems (30 June – 4 July, 2024). Rhodes, Greece. Paper ID: 171.
9. Rezaei H., Ghomsheh J.M., Kowsary F., Ahmadi P. Performance assessment of a range-extended electric vehicle under real driving conditions using novel PCM-based OBKsystem. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101527>.
10. Andrzejczyk R., Muszyński T., Fabrykiewicz M., Rogowski M. Heat Transfer Enhancement of Modular Thermal Energy Storage Unit for Reversible Heat Pump Cooperation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108498>.
11. Vasta S. Adsorption Air Conditioning for Automotive Applications: A Critical Review. 2023. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202306.1171.v1>.
12. Hou L., Xing X. Automotive Air Conditioning System Fuzzy Control Algorithm. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 181–182. 787–791. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.181-182.787>.
13. Yakubu A., Xiong S., Jiang Q., Zhao J., Wu Z., Wang H., Ye X., Wangsen H. Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 77. 834–843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.030>.
14. Ghawash F., Hovd M., Schofield B. Energy Efficient Temperature and Humidity Control in Building Climate Systems. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58. 544–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.393>.
15. Приходько М. А., Герасимов Г. Г. Термодинаміка та теплопередача: навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2008. 250 с.
16. Smith J. M., Van Ness H. C., Abbott M. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 7th Edition. McGraw-Hill Education, 2005.
17. Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edition. Wiley, 2006.
18. Mao Y., Wang J., Li J. Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.099>.

### References

1. Yang, Y., Huang, Y., Zhao, J. (2020). Optimization of the automotive air conditioning strategy based on the study of dewing phenomenon and defogging progress. *Applied Thermal Engineering*, 169. 114932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114932> (in English).

2. Chang, T.-B., Lin, Y.-S., Hsu, Y.-T. (2023). CFD simulations of effects of recirculation mode and fresh air mode on vehicle cabin indoor air quality. *Atmospheric Environment*, 293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119473> (in English).
3. Chang, T.-B., Hsu, Y.-T., Huang, J.-W. (2024). Optimal Ventilation Strategies for Balancing Carbon Dioxide and Suspended Particulate Matter Concentrations in Vehicle Cabins. *Atmospheric Environment*, 334. 120697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120697> (in English).
4. Alahmer, A., Mayyas, A., Mayyas, A. A., Omar, M., Shan, D. (2011). Vehicular thermal comfort models; A comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*, 31, 995–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.004> (in English).
5. Ravindra, K., Agarwal, N., Mor, S. (2020). Assessment of thermal comfort parameters in various car models and mitigation strategies for extreme heat-health risks in the tropical climate. *Journal of Environmental Management*, 267. 110655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110655> (in English).
6. Lan, F., Chen, H., Chen, J., Li, W. (2023). Effect of urban microclimates on dynamic thermal characteristics of a vehicle cabin. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103162> (in English).
7. Singmai, W., Onthong, K., Thongtip, T. (2023). Experimental Investigation of the Improvement Potential of a Heat Pump Equipped with a Two-Phase Ejector. *Energies*, 16. 5889. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16165889> (in English).
8. Klingebiel, J., Will, F., Beckschulte, M., Vering, C., Mueller, D. (2024). Data-Driven Model Predictive Control for Energy Efficient and Low-Noise Operation of Air-Source Heat Pumps. 37th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems (30 june – 4 july, 2024). Rhodes, Greece. Paper ID: 171 (in English).
9. Rezaei, H., Ghomsheh, J. M., Kowsary, F., Ahmadi, P. (2021). Performance assessment of a range-extended electric vehicle under real driving conditions using novel PCM-based OBKsystem. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101527> (in English).
10. Andrzejczyk, R., Muszyński, T., Fabrykiewicz, M., Rogowski, M. (2023). Heat Transfer Enhancement of Modular Thermal Energy Storage Unit for Reversible Heat Pump Cooperation. *International Journal of Thermal Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108498> (in English).
11. Vasta, S. (2023). Adsorption Air Conditioning for Automotive Applications: A Critical Review. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202306.1171.v1> (in English).
12. Hou, L., Xing, X. (2011). Automotive Air Conditioning System Fuzzy Control Algorithm. *Advanced Materials Research*, 181–182, 787–791. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.181-182.787> (in English).
13. Yakubu, A., Xiong, S., Jiang, Q., Zhao, J., Wu, Z., Wang, H., Ye, X., Wangsen, H. (2024). Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 77, 834–843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.030> (in English).
14. Ghawash, F., Hovd, M., Schofield, B. (2024). Energy Efficient Temperature and Humidity Control in Building Climate Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 58, 544–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.393> (in English).
15. Prykhodko, M. A., & Herasymov, H. H. (2008). Термодинаміка та теплоperedacha. Rivne : NUVHP (in Ukrainian).
16. Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. (2005). Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 7th Edition. McGraw-Hill Education (in English).
17. Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2006). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edition. Wiley (in English).
18. Mao, Y., Wang, J., Li, J. (2018). Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Applied Thermal Engineering*, 137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.099> (in English).

**V. O. Kovtun**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
[viacheslav.o.kovtun@lpnu.ua](mailto:viacheslav.o.kovtun@lpnu.ua)

**ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF ELECTRIC VEHICLE HEATING,  
VENTILATION, AND AIR CONDITIONING SYSTEM – PERFORMANCE  
OPTIMIZATION AND ENERGY CONSUMPTION REDUCTION**

© Kovtun V., 2024

The article addresses the challenge of improving the energy efficiency of the heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system in electric vehicles. Due to the absence of an internal combustion engine in electric vehicles, there is no additional heat source, meaning that HVAC systems consume a significant portion of the battery energy, thereby reducing the vehicle's range. The aim of this study is to develop an energy-efficient control algorithm for the HVAC system that minimizes energy consumption while maintaining adequate comfort levels for passengers. To achieve this goal, a comprehensive mathematical model of the HVAC system was developed, including models of the environment, ventilation system, evaporator, heater, and air recirculation. The study involves simulating temperature, humidity, and CO<sub>2</sub> concentration in the vehicle cabin.

Computer simulations conducted in Matlab/Simulink enabled a detailed analysis of the dynamic and static characteristics of the proposed system. Comparisons with the baseline system, which only used outside air for climate control, were made under constant conditions: external relative humidity of 100 %, CO<sub>2</sub> concentration of 400 ppm, cabin temperature of 22 °C, and passenger moisture and CO<sub>2</sub> emissions of 100 g/h and 20 g/h, respectively. The simulations demonstrated that the proposed control system significantly reduces energy consumption by 10-40%, depending on external temperatures, compared to the baseline system. At an external temperature of -25 °C, energy consumption was reduced by 46.2 %, and at 25 °C, by 12.1 %.

Energy efficiency improvements are achieved through the optimization of air recirculation, and control of ventilation, evaporator, and heater performance. The proposed system effectively maintains comfortable conditions for passengers, preventing window condensation and stabilizing CO<sub>2</sub> levels in the cabin. Thus, it not only improves comfort but also reduces energy consumption.

The results confirm the potential for significant energy consumption reduction without compromising comfort. Future research may focus on the development of intelligent control algorithms and the implementation of predictive methods to further reduce energy consumption under various operating conditions.

*Keywords: electric vehicle, heating system, ventilation and air conditioning system, energy efficiency, mathematical modeling, control algorithm, air recirculation.*