

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВИТЯЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА З МУЛЬТИ-ПАРАМЕТРИЧНИМ МОНІТОРИНГОМ

Теслюк Є.Ю. – гр. МГЕМ-1-24, магістрант, evg.tes@gmail.com

Біла Т.Я. – к.т.н., доцент, bila.ty@knuvd.edu.ua

Київський національний університет технологій та дизайну

Метою роботи є розроблення інтелектуальної системи автоматичного керування електроприводом витяжного вентилятора на основі мульти-сенсорного моніторингу якості повітря для підвищення енергоефективності, комфорту користувачів та покращення мікроклімату кухонних приміщень.

Традиційні системи кухонної вентиляції працюють на постійній швидкості або керуються вручну, що призводить до надмірного енергоспоживання (до 60% від загального споживання кухонного обладнання) і дискомфорту через шум. Дослідження показують, що впровадження інтелектуальних систем керування вентиляцією на основі IoT та датчиків якості повітря дозволяє знизити споживання енергії на 40...66% без погіршення ефективності видалення забруднень. Інтеграція сенсорів PM2.5, VOC, CO₂, температури та вологості з алгоритмами адаптивного керування забезпечує автоматичну регуляцію швидкості вентилятора відповідно до реального навантаження [1...4]. Особливо актуальним є застосування таких систем на комерційних кухнях ресторанів, де витяжки працюють 12...16 годин на добу. Сучасні рішення використовують Variable Frequency Drives (VFD) для плавного регулювання швидкості двигуна і технологію demand-controlled kitchen ventilation (DCKV) для оптимізації роботи залежно від інтенсивності приготування [5].

Розроблена інтелектуальна система забезпечує автоматичне керування електроприводом витяжного вентилятора через інтеграцію сенсорів якості повітря, мікроконтролерного керування та частотно-регульованого приводу.

Запропонована система використовує багатоступеневий алгоритм адаптивного керування, що забезпечує ефективне і превентивне керування вентиляцією.

Таблиця – Функціональні модулі інтелектуальної системи керування
витяжним вентилятором

Функціональний модуль	Компоненти	Призначення та можливості
Моніторинг якості повітря	Датчик PM2.5 (Plantower PMS5003), VOC-сенсор (SGP41), датчик CO ₂ (SenseAir S8), термогігрометр (DHT22)	Вимірювання концентрації дрібнодисперсних частинок, летючих органічних сполук, вуглекислого газу, температури та вологості з частотою 1 Гц для визначення інтенсивності приготування.
Виявлення аномалій	Датчик MQ-2 (метан/пропан), димовий детектор	Раннє виявлення витоку газу та задимлення з аварійним переведенням вентилятора на максимальну швидкість і сповіщенням користувача
Керування приводом	Частотно-регульований привод (VFD), безщітковий двигун BLDC 250W, ШІМ-контролер	Плавне регулювання швидкості обертання від 20% до 100% (300...1500 об/хв) для оптимізації продуктивності та зниження шуму.
Інтелектуальний аналіз	Мікроконтролер STM32F4, алгоритм нечіткої логіки (Fuzzy Logic), предиктивна модель (Random Forest)	Аналіз даних від сенсорів, класифікація режимів приготування (смаження/варіння/випікання), прогнозування потреби у вентиляції на 5...10 хвилин.
Автоматичні режими	Планувальник подій, інтеграція з розумними плитами	Режим «приготування» (автоматична активація при вмиканні плити), режим «очищення» (продовження роботи 10 хв після вимкнення плити), режим «економія» (мінімальна швидкість при відсутності приготування).
Користувацький інтерфейс	Сенсорна панель з дисплеєм, мобільний додаток iOS/Android, голосове керування	Ручне керування швидкістю (5 рівнів), перегляд real-time якості повітря, налаштування чутливості автоматичного режиму, статистика енергоспоживання.
Енергомоніторинг	Датчик струму/напруги (ACS712), лічильник енергії	Вимірювання миттєвої потужності та накопиченого споживання з відображенням економії порівняно з постійною швидкістю.

Алгоритм керування вентилятором складається з виконання наступних етапів.

1) *Старт збору даних.* Система ініціалізує всі сенсори та починає циклічний збір даних з частотою 1 Гц. Мікроконтролер зчитує значення PM2.5 (мкг/м³), VOC (ppb), CO₂ (ppm), температуру (°C), вологість (%) та бінарні сигнали від датчиків газу та диму.

2) *Нормалізація сенсорних даних.* Вхідні дані нормалізуються у діапазон для подальшої обробки алгоритмом нечіткої логіки. Кожен параметр має власні вагові коефіцієнти залежно від критичності для вентиляції: PM2.5 (вага 0.4), VOC (вага 0.3), температура (вага 0.2), CO₂ (вага 0.1).

3) *Класифікація режиму приготування.* Алгоритм нечіткої логіки аналізує комбінацію параметрів і класифікує поточний стан у один з чотирьох режимів:

- режим «спокій» (20...30% швидкості): $PM_{2.5} < 25$ мкг/м³ та $VOC < 100$ ppb - мінімальна вентиляція для підтримки свіжості повітря при відсутності приготування;
- режим «легке приготування» (40...60% швидкості): $PM_{2.5}: 25...75$ мкг/м³ або $VOC: 100...300$ ppb - варіння супів, каш, легке тушкування овочів;
- режим «інтенсивне приготування» (70...90% швидкості): $PM_{2.5}: 75...150$ мкг/м³ або $VOC: 300...800$ ppb - смаження на сковороді, гриль, випікання при високих температурах;
- режим «критичний» (100% швидкості + сигнал): $PM_{2.5} > 150$ мкг/м³ або $VOC > 800$ ppb або детекція диму/газу - аварійний режим з максимальною продуктивністю та push-сповіщенням користувачу.

4) *Предиктивна корекція (Random Forest).* Модель машинного навчання аналізує архівні дані за останні 15 хвилин і поточні тренди зміни параметрів. Якщо виявляється різке зростання температури ($\Delta T > 5^{\circ}C$ за 2 хв) або VOC ($\Delta VOC > 100$ ppb за 3 хв), система превентивно підвищує швидкість на 10...15% до досягнення порогових значень. Це запобігає пікам забруднення та покращує комфорт.

5) *Підвищення швидкості на 10...15%.* При виявленні прогнозованого зростання забруднення система плавно збільшує обороти вентилятора через VFD з прискоренням 5%/с для уникнення різких стрибків шуму.

6) *Закінчення: підтримка оптимальної вентиляції.* Система продовжує моніторинг та корекцію швидкості у циклі, забезпечуючи динамічну адаптацію до змін інтенсивності приготування.

Наведемо опис технічної реалізації запропонованої системи керування. Електропривод базується на безщітковому двигуні постійного струму (BLDC) потужністю 250 Вт з електронною комутацією через 3-фазний MOSFET-інвертор. Використання BLDC замість асинхронного двигуна підвищує ККД на 15...20% і знижує рівень шуму на 8...12 дБ за тих самих оборотів.

Частотно-регульований привод (VFD) забезпечує плавне регулювання швидкості через ШІМ-модуляцію з частотою 20 кГц (вище порогу чутності людського вуха). Це виключає акустичний дискомфорт від «свисту» приводу, характерного для низькочастотної модуляції.

Мікроконтролер STM32F407 з ARM Cortex-M4 (168 МГц, 192 кБ RAM) забезпечує оброблення даних від восьми сенсорів у реальному часі з затримкою менше 50 мс. Вбудований 12-бітний АЦП дозволяє точно вимірювати аналогові сигнали від датчиків струму та напруги для енергомоніторингу.

Модель Random Forest навчена на дата-сеті з 5000 записів різних сценаріїв приготування, зібраних протягом місяця тестування. Точність прогнозування становить 87%, що дозволяє превентивно реагувати у 8 з 10 випадків інтенсивного приготування.

Тестування системи протягом 30 днів на домашній кухні показало: зниження середнього споживання енергії на 42% (з 1.8 кВт·год/добу до 1.05 кВт·год/добу) порівняно з роботою на постійній швидкості 70%; зниження пікових концентрацій PM2.5 на 35% завдяки превентивному збільшенню швидкості перед інтенсивним приготуванням; зменшення середнього рівня шуму на 11 дБ (з 62 дБ до 51 дБ) через роботу на низьких швидкостях 85% часу; точність класифікації режимів приготування становить 91%, точність прогнозування - 87%.

Висновок. Розроблена інтелектуальна система автоматичного керування електроприводом витяжного вентилятора на основі мульти-сенсорного моніторингу (PM2.5, VOC, CO₂, температура, вологість) і багатоступеневого алгоритму з нечіткою логікою та предиктивною корекцією забезпечує зниження енергоспоживання на 42% та рівня шуму на 11 дБ порівняно з традиційними системами. Використання BLDC-двигуна з VFD і моделі Random Forest дозволяє превентивно реагувати на зміни інтенсивності приготування, підвищуючи комфорт та якість повітря у кухонних приміщеннях.

Список використаних джерел:

1. An IoT based smart kitchen appliance to control and monitor exhaust system / A. Patel and other. IEEE. 2024. DOI: 10.1109/CONIT61985.2024.11007377
2. Revolutionizing Kitchen Safety with IoT-Powered Solutions for a Secure Culinary Environment / M. Singh and other. IEEE. 2024. DOI: 10.1109/DASA61125.2024.10866174
3. Kitchen Hood Controls / Melink Intelli-Hood. 2024. URL: <https://melinkcorp.com/kitchen-hood-controls/>
4. Design and Implementation of a Framework for Smart Home Automation Based on Cellular IoT, MQTT, and Serverless Functions / A. Lombardo and other. Sensors. 2023. Vol. 23, №9. DOI: 10.3390/s23094459
5. Commercial Kitchen Ventilation Trends for 2024 / Hood Filters Blog. 2023. URL: <https://blog.hoodfilters.com/2023/12/19/navigating-the-future-of-commercial-kitchen-ventilation-in-2024-and-beyond/>