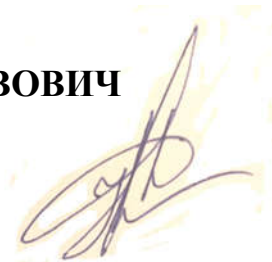


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

СЛАВІНСЬКИЙ ДМИТРО В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ



УДК 681.51:614.8.086.3

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ МОТОРИЗОВАНИМ
РЕСПРАТОРОМ НА ОСНОВІ РЕГУЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ ПОТОКІВ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кривий Ріг – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Ткачов Віктор Васильович,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Міністерства освіти і науки України

професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Положаєнко Сергій Анатолійович,

Національний університет «Одеська політехніка»

Міністерства освіти і науки України,

завідувач кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій;

доктор технічних наук, професор

Мацуй Анатолій Миколайович,

Центральноукраїнський національний технічний університет

Міністерства освіти і науки України,

доцент кафедри автоматизації виробничих процесів.

Захист відбудеться «20» червня 2024 р. о 10.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03 у Криворізькому національному університеті Міністерства освіти і науки України за адресом: 50027, м. Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11.

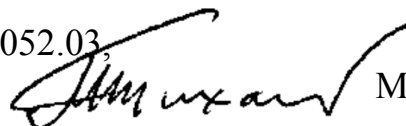
З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Криворізького національного університету за адресом: 50002, м. Кривий Ріг, вул. Гірничих інженерів, 37.

Автореферат розісланий «17» травня 2024 року.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03

кандидат технічних наук, доцент



М.П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день в багатьох галузях промисловості залишаються робочі процеси та операції, які працівник виконує в умовах високої концентрації пилу в повітрі робочої зони. Щоденна та інтенсивна праця при виконанні цих завдань, обумовлює фізіологічні зміни та збільшує ризик виникнення професійних захворювань органів дихання з пиловою етіологією: пневмоконіоз різного походження та пилові бронхіти. Згідно інформації Фонду соціального страхування України за 2022 рік у структурі професійних захворювань частка хвороб органів дихання сягає 41,6 % від загальної кількості діагнозів.

Останнім часом, для підвищення ефективності захисту працюючих від впливу забрудненого повітря в робочій зоні, поширення набувають моторовані повітрянагнітальні фільтрувальні пристрої або моторизовані респіратори (англ. Powered air purifying respirator, PAPR). Застосування останніх, дозволяє зменшити опір диханню та за рахунок створення надмірного тиску повітря у підмасковому просторі, зменшити ймовірність потрапляння забрудненого повітря під маску. Однак, повна відсутність або недостатня функціональність наявних систем керування параметрами повітряного потоку в моторизованих респіраторах не дозволяють ефективно використовувати можливості цих пристроїв.

Функціональні обмеження в роботі моторизованого респіратора можуть призвести до того, що в разі недостатньої кількості повітря, що подається, під час вдиху людина має прикладати більше зусиль для дихання створюючи розрідження в масці, в наслідок чого забруднене повітря може потрапити всередину маски крізь нещільності вздовж полоси обтюрації. При видиху, тиск в масці може значно збільшитись, що також може негативно вплинути на самопочуття та здоров'я людини.

Дослідженнями моторованих повітрянагнітальних фільтрувальних пристроїв та розробкою систем керування ними займалася низка науковців: О.В. Сахаров, N. Wagner, S. Wood, Miracle I. Nazarious, Simona Del Ferraro, D. Khoo та ін. З огляду на особливості функціонування моторизованого респіратора, як об'єкта, в якому відбувається рух газоподібних речовин (повітря) під дією зовнішніх сил, також необхідно прийняти до уваги публікації науковців з цього напрямку: В.А. Демченко, Ю.В. Бразалук, Ye Yao, J. Bonassa, Yu. Yuebin та ін. Також варто зауважити значний внесок до розробки нових засобів захисту органів дихання науковців: А.А. Еннана, Н.М. Абрамової, С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко та ін.

Отже, дослідження математичних та імітаційних моделей моторизованого респіратора і розробка автоматизованої системи керування тиском повітря в підмасковому просторі респіратора, що враховує можливість зміни режиму дихання при зміні фізичного навантаження працівника, є актуальним науково-технічним завданням, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність конкурентоспроможність»,

затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р.

Основою дисертаційної роботи стали матеріали, які узагальнюють дослідження автора у рамках реалізації тематичних планів науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка» за темою: «Інтелектуальні технології керування процесами гірничого виробництва в задачах енергозбереження та енергоефективності» (№ держ. реєстрації 0113U000402), у якій автор брав участь як співвиконавець.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи моторизованого респіратора, шляхом розробки автоматизованої системи керування тиском повітря в масці із компенсацією впливу циклічних потоків повітря при різних режимах дихання людини.

Визначена мета роботи обумовила необхідність розв'язання наступних завдань:

- проаналізувати вітчизняний та закордонний досвід створення систем контролю та керування роботою засобів індивідуального захисту органів дихання людини для визначення основних напрямків автоматизації моторизованого респіратора;
- розробити математичну модель моторизованого респіратора, як об'єкта автоматичного керування;
- дослідити роботу фізичної моделі моторизованого респіратора для перевірки і удосконалення його математичної моделі, розробки імітаційної моделі та визначення параметрів циклу дихання людини;
- розробити імітаційну модель системи керування тиском повітря у масці моторизованого респіратора для дослідження впливу зміни параметрів циклу дихання користувача на рівень коливань тиску повітря в масці та підвищення ефективності його роботи;
- перевірити ефективність роботи складових системи керування тиском повітря в масці та захисних властивостей моторизованого респіратора в реальних умовах.

Об'єктом дослідження є процес керування тиском повітря в підмасковому просторі моторизованого респіратора.

Предметом дослідження є математичні та імітаційні моделі й методи керування процесом підтримання тиску повітря в підмасковому просторі моторизованого респіратора, що забезпечують необхідний потік повітря в залежності від режиму дихання працівника при виконанні робіт різної категорії важкості.

Методи дослідження. Для вирішення поставленого завдання використано методи математичної статистики при аналізі даних експериментальних досліджень та впливу режимів дихання на роботу моторизованого респіратора, методу теорії транспортування газоподібних речовин при аналітичному описі руху повітряного потоку в моторизованому респіраторі, планування експерименту для визначення параметрів фізичної моделі моторизованого респіратора, метод найменших

квадратів для отримання коефіцієнтів апроксимованих функцій, методи теорії автоматичного керування для розробки та моделювання системи керування тиском повітря в масці моторизованого респіратора.

Теоретичні та експериментальні дослідження виконувались з використанням ліцензованих програмних продуктів: Excel Microsoft365, SolidWorks, MATLAB Online, ArduinoIDE.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Врахування при розробці системи керування прямопропорційної залежності значення відхилення тиску повітря у масці моторизованого респіратора від уставки та амплітуди дихання працівника, забезпечує підвищення коефіцієнта захисту респіратора та дозволяє зменшити зусилля, які необхідні для дихання.

2. Визначення часу захисної дії моторизованого респіратора, забезпечується шляхом врахування при розробці системи керування залежностей величини та швидкості зростання додаткового опору шару пилу на фільтрувальній поверхні, що прямопропорційні витраті повітря до маски.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

– отримано математичну модель динаміки тиску повітря в масці моторизованого респіратора, що дало можливість розробити систему керування тиском повітря, в якій враховано вплив циклічних потоків від дихання людини при змінному фізичному навантаженні;

– запропоновано метод регулювання тиску повітря в масці моторизованого респіратора шляхом керування швидкістю обертання ротора електродвигуна вентилятора для збільшення ступеня компенсації коливань тиску від дихання при інтенсифікації фізичного навантаження;

удосконалено:

– імітаційну модель системи керування тиском повітря в масці моторизованого респіратора шляхом впровадження програмного модуля формування додаткового опору на фільтрувальній поверхні, який впливає на час захисної дії, що дозволило скорегувати метод визначення уставки тиску повітря відповідно до реальних умов експлуатації респіратора;

отримав подальший розвиток:

– метод еквівалентного заміщення «опір-ємність» для систем транспортування газоподібних речовин, що дозволило отримати математичну модель зміни тиску повітря в масці моторизованого респіратора в залежності від швидкості обертання крилатки на роторі електродвигуна вентилятора, із врахуванням зміни опору повітряному потоку.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та результатів.

Наукові положення, новизна та висновки, представлені в дисертації, обґрунтовані на основі результатів перевірки відповідності розробленого зразка моторизованого респіратора до вимог Державних стандартів України та Національного інституту охорони праці (США) в ТОВ НВП «Стандарт» на базі

випробувальної лабораторії технічної експертизи засобів колективного та індивідуального захисту органів дихання працюючих.

В рамках лабораторних досліджень, за участі випробувачів була визначена захисна ефективність фільтрувальних респіраторів з примусовою подачею повітря та встановлено, що осереднений результат коефіцієнта захисту випробуваних зразків коливався в межах 99,93÷99,97%, що відповідає вимогам стандарту ДСТУ EN 12941:2004.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Математична модель, отримана на основі аналітичного методу розрахунку, дає можливість налаштування параметрів для різних конструкцій моторизованих респіраторів.

2. Імітаційна модель системи керування тиском повітря в масці моторизованого респіратора використана для визначення необхідної ємності акумуляторної батареї, із врахуванням вимог до часу автономної експлуатації. Результат моделювання показав, що для автономної роботи моторизованого респіратора впродовж 5 годин, необхідна ємність акумулятора становить 10 А·год.

3. Запропоновано спосіб керування тиском повітря у підмасковому просторі моторизованого респіратора з урахуванням залежності циклічності повітряних потоків від дихання та змін інтенсивності фізичного навантаження працівника з розробкою відповідного програмного забезпечення, функціонування системи керування як окремо, так і у складі системи керування роботою моторизованого респіратора. Це дозволило отримати ступінь компенсації відхилень тиску при диханні в межах 88,6÷95 % при уставці тиску 300 Па.

4. Розроблено експериментальний зразок моторизованого респіратора, що використовується для подальших досліджень впливу різних параметрів на його функціонування.

5. За результатами дисертаційної роботи отримано патент № 122788 Україна, «Фільтрувальний респіратор», за який отримано диплом 2 ступеню на Відкритому конкурсі на кращий патент у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки, 2018 р.; патент № 147372 Україна, «Фільтрувальний дихальний апарат з примусовою подачею повітря», за який отримано диплом 2 ступеню на Відкритому конкурсі на кращий патент у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки, 2021 р.; патент № 148810 Україна, «Фільтрувальний респіратор», за який отримано диплом 3 ступеню на Відкритому конкурсі на кращий патент у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки, 2022 р.

6. Розроблено лабораторний стенд для дослідження роботи моторизованого респіратора, що буде впроваджено у навчальний процес на кафедрі кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем в рамках підготовки фахівців за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» для дисциплін: «Технічні засоби автоматизації», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів автоматизації» та виконання магістерських науково-дослідних робіт.

Особистий внесок здобувача.

Дисертація є підсумковим результатом роботи автора. Здобувачем обгрунтовано актуальність теми, виконано аналіз джерел інформації з означеного питання, у тому числі наукової літератури та ресурсів мережі Internet, сформульовано завдання дослідження. Автором адаптовано метод заміщення «опір-ємність» для складових елементів моторизованого респіратора та розроблена на його базі аналітична модель зміни тиску повітря в підмасковому просторі, створена фізична модель моторизованого респіратора для уточнення параметрів математичної моделі зміни тиску повітря, розроблена система керування тиском повітря в підмасковому просторі моторизованого респіратора на базі пропорційно-інтегрального регулятора та розроблено програмне забезпечення системи керування роботою моторизованого респіратора.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати роботи доповідались на XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 1–3 березня 2023 р.), Науково-практична конференція «Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада» (м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 11–13 жовтня 2023 р.), XI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 22–24 листопада 2023 р.), I (VII) Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційні технології: теорія і практика» (м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 20–22 березня 2024 р.), IX Міжнародний молодіжний конгрес. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. (м. Львів, «Львівська політехніка», 28–29 березня 2024 р.).

Публікації. За результатами наукових досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, опубліковано 16 наукових праць, з них 4 статті у періодичних виданнях, які включені до наукометричних баз Web of Science та Scopus, 3 статті у фахових виданнях України, отримано 3 патенти України на корисну модель, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 132 найменувань на 16 сторінках та 8 додатків на 37 сторінках; містить 80 рисунків і 8 таблиць. Загальний обсяг роботи 204 сторінок, з них 134 – основний текст.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульована мета і завдання досліджень. Наведено відомості про наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, вказано кількість публікацій за тематикою дисертаційної роботи. Зазначений особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуто засоби захисту органів дихання людини в напрямку їх автоматизації. Підкреслено проблему професійних захворювань органів дихання людини та питання захисту органів дихання від потрапляння забрудненого повітря та застосування, для вирішення цих питань, моторизованих респіраторів. Розглянуто особливості конструкції та функціонування моторизованих респіраторів, як об'єктів автоматизації.

Розглянуто методи математичного опису процесів транспортування газоподібних речовин, в тому числі і для подібних за будовою і функціонуванням об'єктів інших галузей промисловості. Зауважено можливість представлення дихання користувача у вигляді гармонічного сигналу.

Аналіз існуючих систем керування параметрами повітряного потоку в моторизованих респіраторах та представлених на світовому ринку зразків моторизованих респіраторів показав наявність низки недоліків: недостатня компенсація опору диханню від фільтрувальних елементів; ручне регулювання витрати повітря до маски може призвести до недостатньої кількості повітря при зміні режиму дихання та викликати потрапляння забрудненого повітря всередину маски.

В результаті обґрунтування рішень вищевказаних питань у першому розділі сформульовані мета і завдання дослідження.

Другий розділ присвячено розробці математичної моделі моторизованого респіратора.

Зважаючи на подібність структури та принципів функціонування моторизованого респіратора до систем провітрювання приміщень та подачі газоподібних речовин до технологічних об'єктів був виконаний аналітичний опис процесів, що мають місце в моторизованому респіраторі, за допомогою рівняння рівноваги (1) та еквівалентної схеми заміщення з елементами «опір-ємність» (рис. 1):

$$Q_{M_{вх}} - Q_{M_{вих}} = V \frac{d\rho}{dt}, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

V – об'єм повітря, м³;

t – час, с;

$Q_{M_{вх}}$, $Q_{M_{вих}}$ – масова витрата повітря на вході та виході об'єкта, кг/с.

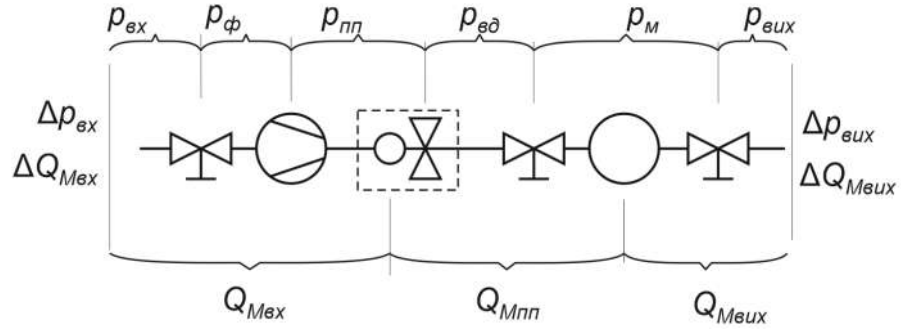


Рисунок 1 – Схема заміщення об'єкта: $p_{вх}$, $p_{вих}$ – тиск на вході та виході, Па; $p_{ф}$ – тиск (розрідження) після фільтра, Па; $p_{пп}$ – тиск в повітропроводі, що утворюється при роботі вентилятора, Па; $p_{вд}$ – тиск перед клапаном вдиху, Па; $p_{м}$ – тиск в масці, Па; $\Delta p_{вх}$, $\Delta p_{вих}$ – зміни тиску повітря на вході та виході системи, Па; $Q_{Мвх}$, $Q_{Мвих}$ – масова витрата повітря на вході та виході системи, кг/с; $Q_{Мпп}$ – масова витрата повітря у повітропроводі, кг/с; $\Delta Q_{Мвх}$, $\Delta Q_{Мвих}$ – зміни масової витрати повітря на вході та виході системи

На основі схеми заміщення було складено рівняння балансу механічної енергії (2) для моторизованого респіратора:

$$\Delta p_{вх} + \Delta p_{в} - \Delta p_{вих} = \Delta p_{ф} + \Delta p_{пп} + \Delta p_{вд} + \Delta p_{м}, \quad (2)$$

де $\Delta p_{вх}$ – зміна тиску на вході, Па; $\Delta p_{вих}$ – зміна тиску на виході, Па; $\Delta p_{в}$ – зміна тиску на вентиляторі, Па; $\Delta p_{ф}$ – зміна тиску на фільтрі, Па; $\Delta p_{пп}$ – зміна тиску у повітропроводі після вентилятора, Па; $\Delta p_{вд}$ – зміна тиску перед клапаном вдиху, Па; $\Delta p_{м}$ – зміна тиску в масці, Па.

Використовуючи рівняння (1, 2) та враховуючи особливості конструктивних елементів моторизованого респіратора було отримано систему рівнянь (3):

$$\begin{cases} -\Delta p_{ф} = a_{ф} \Delta Q_{Мвх}; \\ \Delta p_{пп} - \Delta p_{ф} = -a_{в} \Delta Q_{Мвх} + b_{в} \Delta n; \\ \frac{1}{a_{пп}} \Delta p_{вд} = \frac{\bar{Q}_М}{2\bar{p}} T_i \Delta \dot{p}_{пп} + \frac{1}{a_{пп}} \Delta p_{пп} - \Delta Q_{Мвх}; \\ a_{пп} \frac{\bar{Q}_М}{2\bar{p}} T_i \Delta \dot{Q}_{Мпп} + \Delta Q_{Мпп} = \Delta Q_{Мвх} - \frac{\bar{Q}_М}{\bar{p}} T_i \Delta \dot{p}_{пп}; \\ \Delta p_{вд} - \Delta p_{м} = a_{вд} \Delta Q_{Мпп} + b_{вд} \Delta S_{вд}; \\ \frac{\bar{Q}_М}{\bar{p}} T_i \Delta \dot{p}_{пп} = \Delta Q_{Мпп} - \Delta Q_{Мвих}; \\ \Delta p_{м} = a_{виод} \Delta Q_{Мвих} + b_{виод} \Delta S_{виод} \end{cases} \quad (3)$$

де $a_{ф}$ – коефіцієнт втрат тиску фільтра; $a_{пп}$ – коефіцієнт втрати тиску у повітропроводі; $a_{в}$ та $b_{в}$ коефіцієнти аеродинамічної характеристики вентилятора; $a_{вд}$ – коефіцієнт втрати тиску (статичного) на клапані вдиху; $b_{вд}$ – коефіцієнт втрати тиску (динамічного) на клапані вдиху; $a_{виод}$ – коефіцієнт втрати тиску (статичного) на клапані вдиху; $b_{виод}$ – коефіцієнт втрати тиску (динамічного) на клапані вдиху; T_i – постійна часу ізотермічного процесу; $\bar{Q}_М$ – масова витрата повітря через систему в усталеному режимі.

Після відповідних підстановок, спрощень та перетворень було отримано передавальну функцію (4):

$$W_{\Delta p \rightarrow \Delta p_M}(p) = \frac{0,000000117p + 0,113066}{0,00073989p^3 + 0,056758p^2 + 0,5912155p + 1} \quad (4)$$

Для підтвердження адекватності отриманої математичної моделі були виконані експериментальні дослідження на реальному об'єкті – фізичній моделі з відповідними складовими елементами конструкції.

Фізична модель має структуру, схема якої представлена на рис.2:

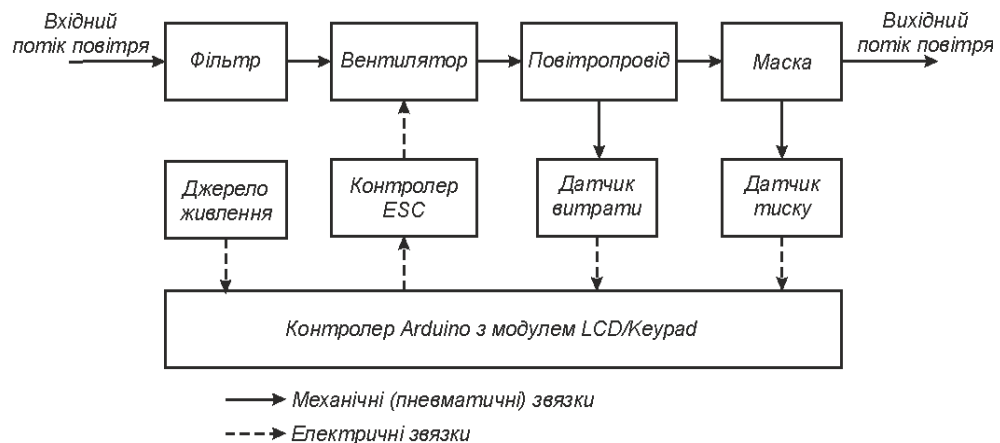


Рисунок 2 – Структурна схема фізичної моделі моторизованого респіратора

Використовуючи метод активного експерименту було виконано ідентифікацію та встановлено, що моторизований респіратор, як об'єкт керування є несиметричним і його математична модель представлена у вигляді передаточної функції, що складається з двох аперіодичних ланок першого порядку з різними постійними часу (5), з'єднаних паралельно, одна з ланок відповідає роботі об'єкта при збільшенні значення керуючого впливу, друга – при його зменшенні:

$$\begin{cases} T_n \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t), \text{ при підйомі;} \\ T_c \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t), \text{ при спаді.} \end{cases} \quad (5)$$

Було також встановлено, що зміни коефіцієнта підсилення передаточної функції від зміни швидкості обертання вентилятора є лінійною залежністю.

Відповідність отриманої передаточної функції моторизованого респіратора, як об'єкта керування до експериментальних даних склала 92 %.

Також встановлено, що відповідність перехідних характеристик аналітичної моделі респіратора та моделі, визначеної на основі експериментальних даних за нормованим середньоквадратичним відхиленням становить 81,6 %.

Використовуючи фізичну модель було отримано дані про дихання людини в респіраторі та порівняно їх з математичною моделлю сигналу, що імітує дихання користувача, у вигляді рівняння:

$$p(t) = A \cdot \sin(2\pi n t / 60) - h \quad (6)$$

де $p(t)$ – тиск, що створюється під час дихання, Па; A – амплітуда дихання, Па; n – частота дихання, $n=60/T$, хв^{-1} ; T – період циклу дихання, с; h – зміщення сигналу, яке залежить від співвідношення фаз дихання (видих/вдих); t – час, с.

Вихідні експериментальні дані отримані при виконанні робіт категорії «Легкі фізичні роботи Іб» та відповідні йому дані математичної моделі сигналу «Дихання» представлені на рис. 3.

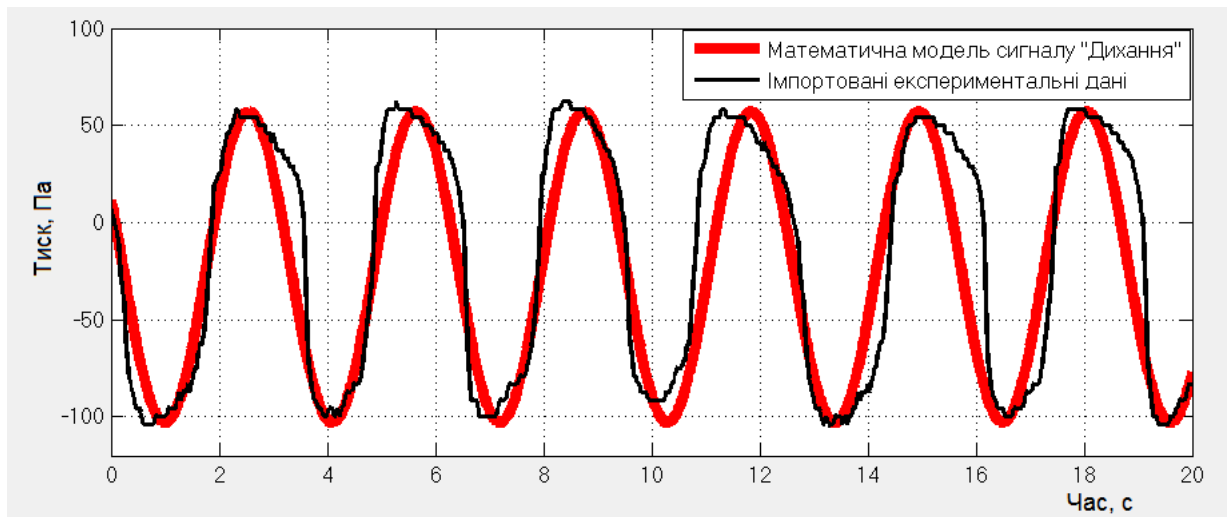


Рисунок 3 – Експериментальні дані для категорії робіт «Легкі фізичні роботи Іб» та дані математичної моделі сигналу «Дихання»

Коефіцієнт кореляції даних математичної моделі сигналу «Дихання» експериментальним даним для різних категорій важкості робіт склав 0,915–0,935. Це дозволяє використати математичну модель сигналу «Дихання» в подальших дослідженнях.

Третій розділ присвячений розробці системи керування тиском повітря в підмасковому просторі моторизованого респіратора.

Визначені наближені параметри регулятора на основі перехідної характеристики (метод Chien-Hrones-Reswick (CHR)), не задовольнили вимоги до системи. За допомогою комп'ютерного моделювання, налаштовано та порівняно роботу декількох типів регуляторів (двохпозиційного, П-, ПІ-, ПІД-) та встановлено, що використання в системі керування ПІ-регулятора з коефіцієнтами $k_p=60$, $k_i=107$ має найкращі показники: статична помилка для 2,15 %, що відповідає 6,24 Па (обумовлена нерівною компенсацією вдиху та видиху).

Перевірка стійкості системи керування виконана за критерієм Гурвіца показала, що система стійка, визначені межі критичних значень коефіцієнтів регулятора при мінімальному та максимальному коефіцієнті підсилення передаточної функції об'єкта: $k_p > -32,78$; $k_i > 0$ ($K_{\min}$), $k_p > -7,75$; $k_i > 0$ ($K_{\max}$). Розрахунок стійкості системи керування за критерієм Найквіста (рис. 4) показав запас по фазі 38,1 град.

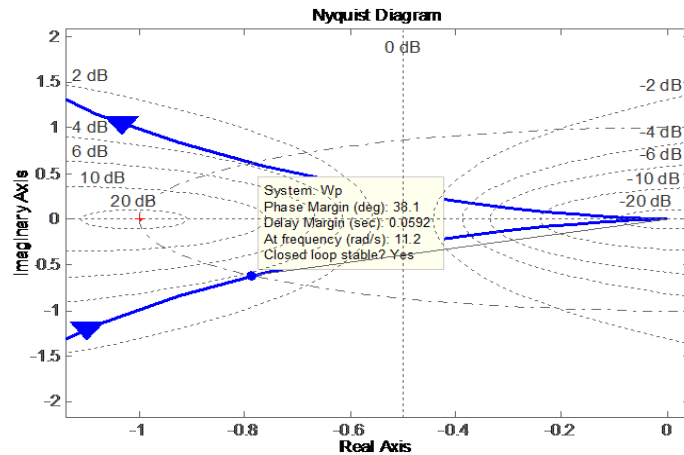


Рисунок 4 – Результати перевірки стійкості системи за критерієм Найквіста

Аналіз результатів експериментальних досліджень та налаштування регуляторів показав вплив значення рівня уставки на коливання тиску при різних режимах дихання (рис. 5), тому було розроблено алгоритм корекції значення уставки відповідно до відхилення тиску повітря та удосконалено імітаційну модель системи керування процесом підтримання тиску в масці, структурна схема якої представлена на рис. 6.

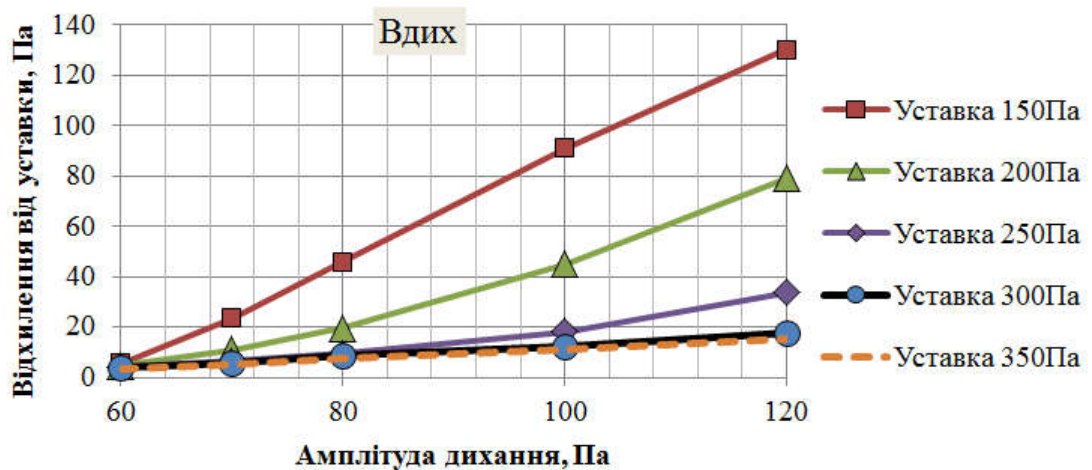


Рисунок 5 – Залежності відхилення тиску повітря в масці від уставки при різних категоріях важкості робіт (амплітудах дихання)

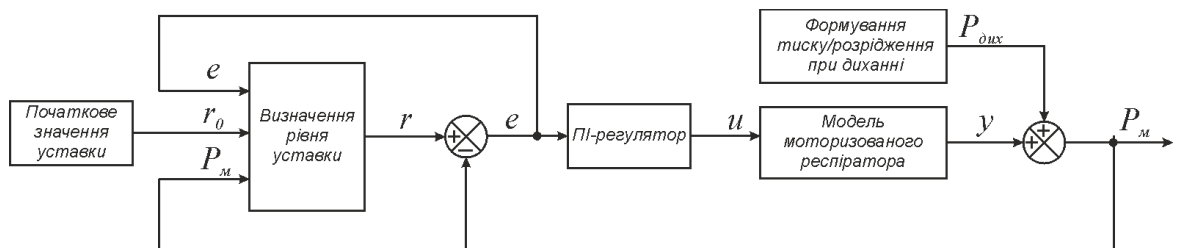


Рисунок 6 – Структурна схема удосконаленої системи керування з корекцією уставки

Для відповідності імітаційної моделі до реальних умов функціонування моторизованого респіатора було додано блок формування додаткового опору на фільтрах, за рахунок накопичення шару пилового осаду (рис.7).

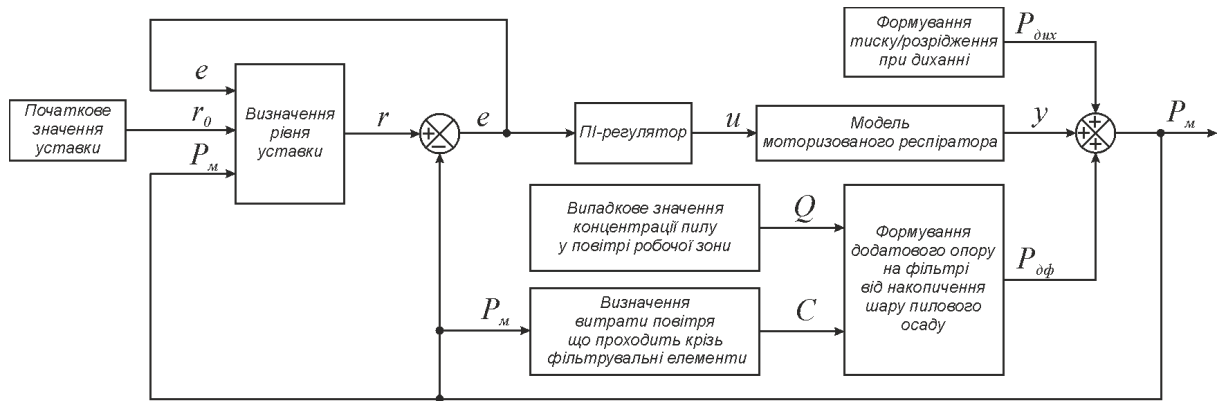


Рисунок 7 – Структурна схема система керування з блоком формування додаткового опору на фільтрах

Результати імітаційного моделювання (рис. 8) свідчать про те, що система керування тиском повітря в масці моторизованого респіратору при використанні ПІ-регулятора з налаштованими параметрами повністю відповідає висунутим вимогам до функціонування об'єкта керування в умовах зміни режимів дихання користувача та забезпечує необхідний тиск повітря в масці при збільшенні опору фільтрувальних елементів через накопичення шару пилового осаду.

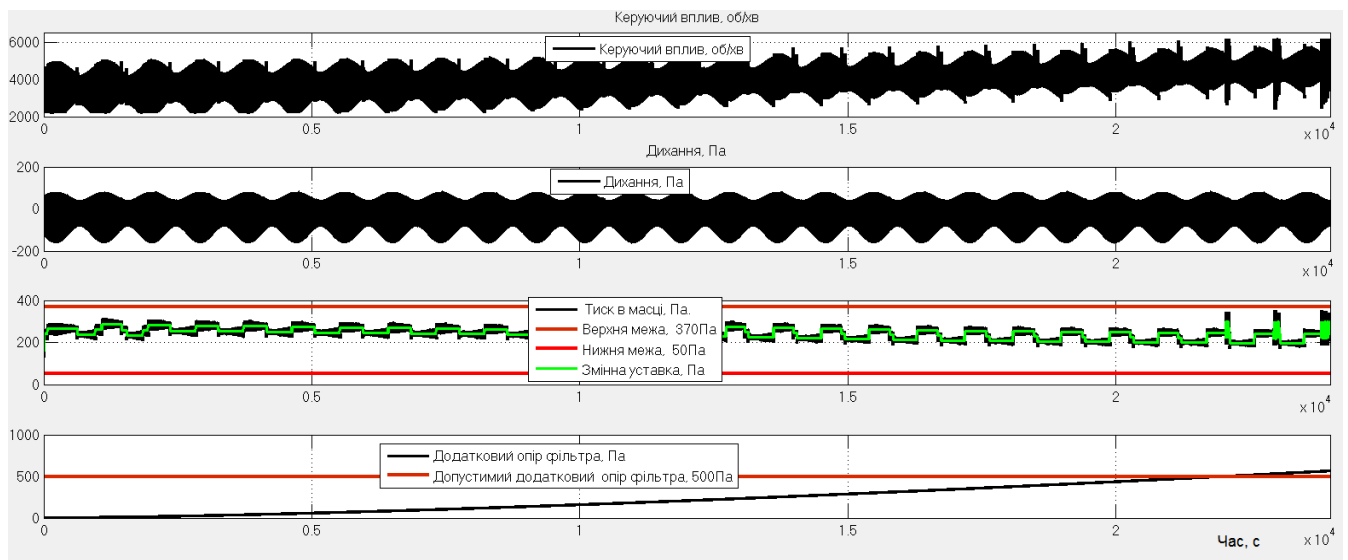


Рисунок 8 – Результати імітаційного моделювання системи керування з блоком формування додаткового опору на фільтрах

При експлуатації моторизованого респіратору важливою характеристикою є час безперервної роботи від автономного джерела живлення – акумулятора. Тому були проведені дослідження для отримання залежності споживаної електричної потужності електронними та електромеханічними елементами системи керування моторизованим респіратором від швидкості обертання вентилятора.

Встановлено, що при збільшенні рівнів регулювання швидкості обертання вентилятора, для послідовної компенсації наростання додаткового опору на фільтрувальній поверхні зменшуються витрати електроенергії (рис. 9), що дозволяє використати акумулятор меншої ємності.

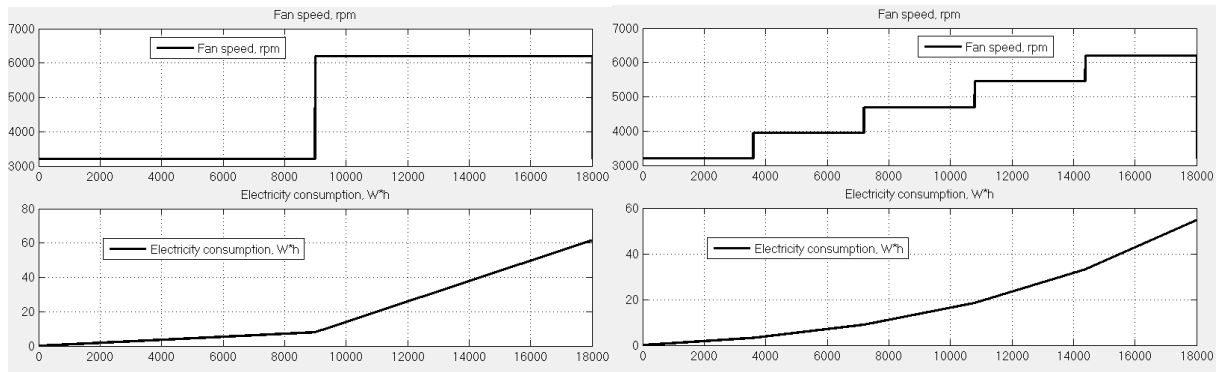


Рисунок 9 – Імітаційне моделювання витрати електроенергії при роботі респіратора в режимі ступінчатої зміни швидкості обертання вентилятора

Розраховано, що для забезпечення безперервної роботи моторизованого респіратора в автономному режимі при 2-х рівнях швидкості обертання вентилятора впродовж 5 годин необхідна ємність акумулятора з напругою 7,4 В складе 10 А год (з урахуванням запасу 20 %).

У **четвертому розділі** представлено розробку зразка моторизованого респіратора для практичної перевірки результатів досліджень та синтезу системи керування тиском повітря в підмасковому просторі.

Отримані результати досліджень та експериментів були втілені при розробці діючого зразка моторизованого респіратора. Для створення конструктивних елементів зразка використано загально доступне програмне середовище автоматизованого проектування та реалізовано за допомогою адитивних технологій 3D друку.

Запропоновано комплекс технічних засобів необхідних для реалізації системи керування роботою моторизованого респіратора.

Перевірка роботи діючого зразка моторизованого респіратора (рис. 10) показала необхідність корегування налаштувань регулятора, на основі досвіду використання та власного відчуття користувача при експлуатації.

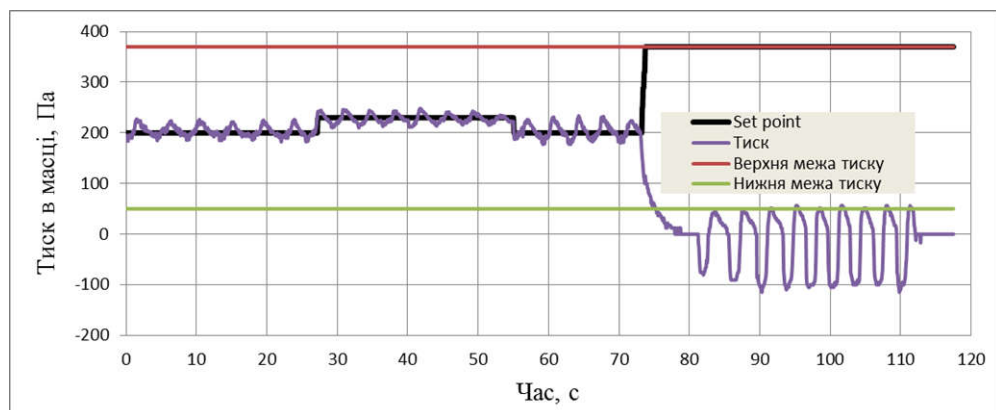


Рисунок 10 – Дані, отримані при роботі моторизованого респіратора

Результати випробувань показали, що функціональність пристрою відповідає вимогам, що висуваються до системи керування тиском повітря в моторизованому респіраторі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науково-дослідною роботою, вирішено науково-технічне завдання автоматизації процесу керування тиском повітря в підмасковому просторі респіратора, шляхом розробки математичної та імітаційної моделей і системи керування моторизованим респіратором, в яких враховані закономірності руху повітря у респіраторі та можливості існуючих технічних засобів.

Виконані у дисертаційній роботі розрахунки, дослідження та експерименти дали змогу зробити наступні висновки щодо результатів:

1. Найважливішими факторами, від яких залежить комфортне самопочуття та здоров'я людини, є витрата та тиск повітря в масці, які в свою чергу можуть змінюватись залежно від режиму дихання користувача відповідно до його фізичного навантаження.

2. Розглянуті методи математичного опису процесів транспортування газоподібних речовин, в тому числі і для подібних за будовою і функціонуванням об'єктів інших галузей промисловості дозволили виконати математичний опис процесів, що мають місце в моторизованому респіраторі за допомогою рівняння рівноваги та еквівалентних схем заміщення з елементами «опір-ємність».

3. Аналіз існуючих способів та систем керування параметрами повітряного потоку в моторизованих респіраторах та представлених на світовому ринку зразків моторизованих респіраторів показав наявність низки недоліків: недостатня компенсація опору диханню від фільтрувальних елементів; ручне регулювання витрати повітря до маски може призвести до недостатньої кількості повітря при зміні режиму дихання та викликати потрапляння забрудненого повітря всередину маски.

4. Складена за результатами аналітичного розрахунку система рівнянь, що описують динаміку зміни тиску повітря в моторизованому респіраторі дозволила отримати передавальну функцію в загальному вигляді. Для підтвердження числових значень коефіцієнтів та адекватності аналітичної моделі було розроблено фізичну модель моторизованого респіратора. За нормативними документами визначено граничні значення тиску в масці респіратора, від 50 до 370 Па. З урахування допустимого додаткового опору фільтру 500 Па, загальний тиск в масці має бути на рівні 850÷950 Па.

5. За результатами ідентифікації встановлено, що моторизований респіратор, як об'єкт керування є несиметричним. Зміни коефіцієнта підсилення передаточної функції від зміни швидкості обертання вентилятора є лінійною залежністю. Відповідність отриманої передаточної функції моторизованого респіратора, як об'єкта керування до експериментальних даних склала 92 %.

6. Встановлено, що відповідність перехідних характеристик аналітичної моделі респіратора та моделі, визначеної на основі експериментальних даних за нормованим середньоквадратичним відхиленням становить 81,6 %.

7. Визначено параметри гармонічного сигналу у вигляді синусоїди з частотою та амплітудою, що відповідають різним режимам фізичного навантаження

працівника для формування сигналу дихання при дослідженні роботи імітаційної моделі моторизованого респіратора. Відповідність експериментальним даним при різних режимах дихання склала 58,74–62,27 %.

8. Визначено наближені параметри регулятора на основі перехідної характеристики (метод Chien-Hrones-Reswick (CHR)). Отримані результати: $k_p=0,0075$; $T_i=8,33$ та $T_d=4,17$, не задовольнили вимоги до системи. За допомогою комп'ютерного моделювання, налаштовано та порівняно роботу декількох типів регуляторів (двохпозиційного, П-, ПІ-, ПІД-) та встановлено, що використання в системі керування ПІ-регулятора з коефіцієнтами $k_p=60$, $k_i=107$ має найкращі показники: статична помилка для 2,15 %, що відповідає 6,24 Па (обумовлена нерівною компенсацією вдиху та видиху).

9. Перевірка стійкості системи керування виконана за критерієм Гурвіца показала, що система стійка, визначені межі критичних значень коефіцієнтів регулятора при мінімальному та максимальному коефіцієнті підсилення передаточної функції об'єкта: $k_p > -32,78$; $k_i > 0$ (Komin), $k_p > -7,75$; $k_i > 0$ (Kotax). Розрахунок стійкості системи керування за критерієм Найквіста показав запас по фазі 38,1 град.

10. Дослідження зміни відхилення тиску повітря в масці, яке залежить від амплітуди та частоти дихання користувача, від значення уставки в системі керування, дозволило визначити коефіцієнт прямої пропорційності ($\approx 0,23$) та сформулювати перше наукове положення.

11. На основі емпіричних залежностей в імітаційній моделі моторизованого респіратора було додано модуль розрахунку додаткового опору фільтра через накопичення шару пилового осаду в умовах зміни режимів фізичного навантаження користувача. Імітаційне моделювання показало, що при коливаннях концентрації пилу в повітрі робочої зони в межах 50–500 г/м³ та об'ємній витраті повітря крізь фільтр 115–260 л/хв. впродовж 5 годин додатковий опір становитиме ≈ 210 Па.

12. Визначено, що для забезпечення автономної роботи моторизованого респіратора впродовж 5 годин, в умовах змінної концентрації пилу та витрати повітря, необхідна ємність акумуляторної батареї становить 10 А·год (з урахуванням запасу 20 %).

13. За результатами експериментальних досліджень та випробувань встановлено, що функціонування системи керування моторизованим респіратором, відповідає визначеним вимогам, забезпечуючи питомий тиск у масці в межах 50–370 Па та витрату повітря не менше 115 л/хв.

14. Розрахунок оцінки економічної доцільності розробки та впровадження моторизованого респіратора, показав, що згідно статистиці професійних захворювань органів дихання в Україні, соціальні збитки на один випадок професійної захворюваності складають ≈ 390 тис.грн. На прикладі ДХК «Павлоградвугілля», розрахована щорічна величина відверненого суспільного збитку $\approx 4,8$ млн.грн.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у періодичних фахових виданнях України

1. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В., Славінський Д. В. Протипиловий респіратор з вимірювачем перепаду тиску. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. 2019. № 78. С. 43–51. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.43-51> (Web of Science)
2. Cheberiachko S., Slavinskyi D., Cheberiachko Yu., Deryugin O. Mathematical model of air flow movement in a motorized filter respirator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. №3. Р. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/097> (Scopus)
3. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В., Славінський Д. В., Клімов Д. Г. Фільтрувальний респіратор з примусовою подачею повітря. *Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць ДВНЗ «ПДТУ»*. Маріуполь, 2020. Вип. 41. С. 155–171. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226205>
4. Славінський Д. В. Визначення моделі моторованого респіатора для дослідження режимів його роботи. *Збірник наукових праць НГУ*. 2023. №72. С. 172–185. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.172>
5. Slavinskyi D., Bilko T., Cheberyachko Y., Cheberyachko S., Deryugin O. Improvement of motorized design filtering respirator. *Machinery & Energetics*. 2023. №14(1). Р. 24–35. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.24> (Scopus)
6. Славінський Д. В., Ткачов В. В., Бойко О. О., Чеберячко Ю. І. Вдосконалення моделі динаміки тиску в масці моторизованого фільтрувального респіатора як об'єкта керування. *Збірник наукових праць НГУ*. 2023. №73. С. 144–153. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.144>
7. Slavinskyi D., Bilko T., Cheberyachko Yu., Cheberyachko S., Deryugin O. Automated air pressure control system in a motorised breathing apparatus. *Machinery & Energetics*. 2024. №15(1). Р. 9–22. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2024.09> (Scopus)

Патенти

8. Фільтрувальний респіратор : пат. 122788 Україна. МПК А62В 23/02, А62В 7/10 / Голінько В. І.; Чеберячко Ю. І.; Фрундін В. Ю.; Чеберячко С. І.; Радчук Д. І.; Славінський Д. В. ; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2. 6 с.
9. Фільтрувальний дихальний апарат з примусовою подачею повітря : пат. 147372 Україна. МПК А62В 23/00, А62В 18/00 / Голінько В. І.; Чеберячко С. І.; Чеберячко Ю. І.; Дерюгін О. В.; Славінський Д. В.; Радчук Д. І.; Клімов Д. Г. ; опубл. 06.05.2021, Бюл. № 18. 12 с.
10. Фільтрувальний респіратор : пат. 148810 Україна. МПК А62В 23/02, А62В 7/10 / Чеберячко С. І.; Чеберячко Ю. І.; Дерюгін О. В.; Саїк П. Б.; Дичковський Р. О.; Муха О. А.; Лозинський В. Г.; Славінський Д. В.; Яворська О. О.; Яворський А. В. ; опубл. 23.09.2021, Бюл. № 38. 5 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Славінський Д. В. Особливості математичного моделювання респіратора з примусовою подачею повітря. *«Наукова весна» 2023* : матеріали XIII Міжнар. наук.-тех. конф студентів, аспірантів та молодих вчених (1–3 березня 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 156–157.
12. Славінський Д. В., Бойко О. О., Воскобойник Є. К. Перспективи розвитку засобів індивідуального захисту органів дихання. *Міжнародний форум «Безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада»* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (11–13 жовтня 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 139–140.
13. Славінський Д. В., Клімов Д. Г., Чеберячко Ю. І. Удосконалення роботи моторизованого фільтрувального респіратора. *Міжнародний форум «Безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада»* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (11–13 жовтня 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 150–151.
14. Славінський Д. В. Дослідження роботи системи керування тиском повітря в масці моторованого респіратора при різних режимах дихання. *Молодь: наука та інновації* : матеріали XI Міжнар. наук.-тех. конф студентів, аспірантів та молодих вчених (22–24 листопада 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 457–459.
15. Славінський Д. В. Ідентифікація сигналу «Дихання людини» для імітаційної моделі системи керування моторизованим респіратором. *Інформаційні технології: теорія і практика* : тези доп. I (VII) Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених (20–22 березня 2024 р.). Дніпро, 2024. С. 132.
16. Славінський Д. В., Воскобойник Є. К. Аналіз систем керування моторованими повітрянагнітальними фільтрувальними пристроями. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : зб. матер. IX Міжнар. молод. конгр. (28-29 березня 2024 р.). Львів, 2024. С. 93.

Особистий внесок автора в роботах, що опубліковані у співавторстві, полягає:

[1] – концепція конструктивної реалізації вимірювача тиску/розрідження, вибір технічних засобів та розробка алгоритму роботи вимірювача тиску; [2] – аналіз процесів, що мають місце при транспортуванні повітря в моторизованому респіраторі, вибір методу побудови та розробка математичної моделі зміни тиску повітря в масці моторизованого респіратора; [3] – обґрунтування вибору апаратно-програмних засобів для створення системи керування, розробка принципової електричної схеми системи керування та програмного забезпечення до неї; [5] – розробка конструкції блоку подачі повітря, синтез математичної моделі респіратора та дослідження роботи моторизованого фільтрувального респіратора на основі програмної моделі у спеціалізованому програмному середовищі; [6] – експериментальні дослідження та аналіз характеристик моторизованого респіратора, як об'єкта керування, визначення залежності коефіцієнта посилення від зміни тиску повітря в масці респіратора; [7] – експериментальні дослідження, імітаційне моделювання системи керування, визначення параметрів дихання людини в масці

респіратор в залежності від фізичного навантаження; [8] – спосіб контролю тиску повітря в масці респіатора; [9] – спосіб контролю та регулювання параметрів повітряного потоку та алгоритми зміни режиму роботи респіатора; [10] – спосіб контролю притискних зусиль смуги обтюрації респіатора; [12] – пошук та структурування інформації; [13] – розробка структури та апаратна реалізація системи керування моторизованим респіратором. [16] – аналіз джерел та структурування інформації.

АНОТАЦІЯ

Славінський Д.В. Автоматизація процесу керування моторизованим респіратором на основі регулювання циклічних потоків. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування (технічні науки). – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

У дисертаційній роботі виконано аналіз технічних характеристик моделей моторизованих респіраторів, що представлені на світовому ринку, визначено їх основні недоліки. Сформульовані мета і завдання дослідження.

За результатами аналітичного розрахунку отримана передавальна функція в загальному вигляді. Для підтвердження числових значень коефіцієнтів та адекватності аналітичної моделі було розроблено фізичну модель моторизованого респіатора.

За результатами ідентифікації фізичної моделі встановлено, що зміни коефіцієнта підсилення передаточної функції від зміни швидкості обертання вентилятора є лінійною залежністю. Відповідність перехідних характеристик аналітичної моделі респіатора та його фізичної моделі становить 81,6%.

Отримані результати досліджень та експериментів були втілені при розробці діючого зразка моторизованого респіатора.

Результати перевірки роботи діючого зразка моторизованого респіатора показали, що система керування тиском повітря в підмасковому просторі респіатора повністю виконує своє завдання, значення тиску не перевищує встановлених обмежень.

Ключові слова: моторизований респіратор, автоматизація, математична модель, ідентифікація, імітаційна модель, дихання, фільтр, захист, пил, регулювання, тиск, система керування, циклічні потоки.

ABSTRACT

D.V. Slavynskiyi. Automation of the control process for the motorized respirator based on the regulation of cyclic flows. – On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate's Degree of Technical Sciences by specialty 05.13.07 – automation of control processes (technical sciences). – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024.

The dissertation is devoted to solving the current scientific and technical task of increasing the effectiveness of individual protection of human respiratory organs by

determining the parameters of the regulator for the automated air pressure control system in the under-mask space of the powered air-purifying respirator, which takes into account the possibility of changing the breathing mode when the physical load of the worker changes, subject to appropriate restrictions.

The work analyzed the protective and operational characteristics of modern powered air-purifying respirator, the experience of their use, as well as the working conditions and places of stay of users, which made it possible to formulate general requirements for such devices.

Taking into account the peculiarities of powered air-purifying respirator, as objects in which air moves, the methods of mathematical description of the processes of transportation of gaseous substances were considered, including for objects similar in structure and functioning in other branches of industry.

Given the design and principle of operation of the motorized respirator, it can be noted that there is no change in the energy balance of the air flow at the inlet and outlet, so the energy conservation equation can be disregarded.

Attention is paid to the mathematical description of the user's breathing and the possibility of its representation in the form of a harmonic signal is noted

An analysis of the control systems for air flow parameters in motorized respirators, among the samples presented on the world market, showed the presence of a number of shortcomings, among which it is worth highlighting the low level of comfort of most devices due to the insufficient compensation of breathing resistance from filter elements; manual adjustment of air flow to the mask (2-5 modes or smooth change using a rotary or slider control), which can cause contaminated air to enter the mask.

A physical model of a powered air-purifying respirator was developed to determine the numerical values of the coefficients and to confirm the adequacy of the analytical model. It was also established that the correspondence between the transient characteristics of the analytical model of the respirator and the physical model, according to the normalized root mean square deviation, is 81.6%.

When using a PI controller with adjusted coefficients, the control system shows the best indicators: a static error of 2.15%, (due to unequal compensation of inhalation and exhalation).

According to the Nyquist hodograph, it was determined that the control system has a phase margin of 38.1 degrees.

The study of the change in the deviation of the air pressure in the mask, which depends on the amplitude and frequency of the user's breathing, on the value of the setting in the control system, made it possible to determine the coefficient of direct proportionality (≈ 0.23) and form the first scientific statement.

The stages of development of structural elements of a working sample of a powered air-purifying respirator and their manufacture based on additive 3D printing technologies are considered.

On the basis of the Arduino hardware computing platform and related technical means of automation, the general structure of the powered air-purifying respirator control system and the algorithmic and software for the implementation of functions of monitoring and controlling the parameters of the air flow coming to the user have been determined.

According to the results of experimental studies and tests, it was established that the operation of the powered air-purifying respirator control system meets the specified requirements, providing a specific pressure in the mask within the range of 50-370 Pa and an air flow rate of at least 115 l/min.

The calculation of the assessment of the economic feasibility of the development and implementation of a powered air-purifying respirator showed that according to the statistics of occupational diseases of the respiratory organs in Ukraine, social damages for one case of occupational morbidity amount to UAH 390,000

Keywords: motorized respirator, automation, mathematical model, identification, simulation model, breathing, filter, protection, dust, regulation, pressure, control system, cyclic flows.

Підписано до друку 13.05.2024. Формат 60х84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 1,16.
Наклад 100 пр. Зам. № 88.

Видавництво та друкарня ПП «ЛІРА ЛТД»
Вул. Наукова, 5, м. Дніпро, 49107
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6042 від 26.02.2018.
dnipro.lira@gmail.com | +38 (067) 561-57-05 | lira.dp.ua