

© Д.В. Славінський¹, В.В. Ткачов¹, О.О. Бойко¹, Ю.І. Чеберячко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ТИСКУ В МАСЦІ МОТОРИЗОВАНОГО ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

© D. Slavynskiy¹, V. Tkachov¹, O. Boyko¹, Y. Cheberiyachko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE PRESSURE DYNAMICS MODEL IN THE MASK FOR A POWERED AIR PURIFYING RESPIRATOR AS AN OBJECT OF CONTROL

Мета. Вдосконалення імітаційної моделі моторизованого фільтрувального респіратора, обґрунтування необхідності планування та проведення додаткових експериментів. Визначення параметрів та підтвердження адекватності імітаційної моделі до об'єкта керування – моторизованого фільтрувального респіратора.

Методика досліджень. Дослідження виконувалися на експериментальному зразку шляхом активного експерименту. Для отримання статичної характеристики послідовно збільшували керуючий сигнал – швидкість обертання вентилятора з кроком 200 об/хв та реєстрували дійсне значення – тиск в масці респіратора. На підставі даних експерименту побудована статистична характеристика та визначена залежність коефіцієнта посилення моделі до керуючого впливу. Перевірка отриманої моделі на адекватність до об'єкта керування виконана за критерієм адекватності Фішера.

Результати дослідження. За результатами дослідження встановлено, що статична характеристика моторизованого фільтрувального респіратора, як об'єкта керування, за каналом «швидкість обертання вентилятора – тиск в масці» є нелінійною, а коефіцієнт посилення лінійно залежить від значення керуючого впливу. На підставі аналізу отриманих даних вдосконалено імітаційну модель моторизованого фільтрувального респіратора.

Наукова новизна. Встановлено, що статична характеристика моторизованого фільтрувального респіратора у визначеному діапазоні керуючого сигналу є нелінійною та коефіцієнт посилення лінійно залежить від швидкості обертання крилатки вентилятора.

Практичне значення. Визначено залежність коефіцієнта посилення від швидкості обертання крилатки вентилятора. Адекватність вдосконаленої імітаційної моделі до об'єкта керування складає 92%. Вдосконалена імітаційна модель моторизованого фільтрувального респіратора дозволяє виконувати дослідження режимів роботи з метою визначення вимог до керування процесом подачі повітря до маски та подальшого синтезу системи керування з використанням регуляторів різного типу.

Ключові слова: моторизований фільтрувальний респіратор, імітаційна модель, дослідження, коефіцієнт посилення, критерії якості моделі.

Вступ. Кількість професійних захворювань органів дихання на українських підприємствах постійно зростає. За останній рік, згідно інформації Фонду соціального страхування України, їх частка склала 41,6 % від загальної кількості

професійних захворювань. Лікування цих хворих потребує значних коштів, а середня сума щомісячних виплат перевищує 11 млрд. грн. [1].

Для очищення повітря та забезпечення захисту органів дихання від аерозолів, парів та газів, що становлять небезпеку для здоров'я та життя людини у різних робочих середовищах все частіше застосовуються моторизовані фільтрувальні респіратори (МФР). Кількість використання МФР швидко зростає у різних галузях промисловості та медичних закладах, особливо при надзвичайних ситуаціях та спалахах пандемічних захворювань [2].

Забезпечення користувача чистим повітрям при використанні МФР виконується через щільно прилеглу півмаску, вільний каптур або шолом. МФР створює потік повітря, що забезпечує високий коефіцієнт захисту, більший ніж багаторазові еластомірні напівмаски або FFR N95. Відповідно до [3] він має коефіцієнт захисту не менше 25 для вільно прилеглих капюшонів і шоломів, 50 для напівмасок, що щільно прилягають, і 1000 для панорамних масок. В МФР використовуються високоефективні повітряні фільтри для твердих часток (HEPA). Фільтри HEPA мають такий же рівень фільтрації, як і P100 (тобто фільтрують не менше 99% частинок діаметром 0,3 мкм і є маслонепроникними). Встановлено, що МФР мають найвищий ступінь захисту органів дихання через більш високу ефективність їх фільтруючих елементів, а також підтримання зовнішнього позитивного тиску [4].

Постановка завдання. Керування тиском повітря в панорамній масці МФР зводиться до підтримки балансу між необхідною витратою повітря, яка змінюється в залежності від фізичного та/або психічного навантаження людини, нижнього рівня надлишкового тиску та верхньої допустимої межі тиску в масці, що обумовлюється вимогами [5]. Регулювання витрати повітря в масці виконується за рахунок зміни швидкості обертання крилатки вентилятора блоку подачі очищеного повітря.

До стабілізації надлишкового тиску в масці респіратора висуваються досить жорсткі вимоги. Зниження тиску нижче нульового рівня, тобто створення розрідження під час вдиху, призведе до потрапляння неочищеного повітря до маски і, відповідно, до легень людини. Надмірне підвищення тиску (вище 370Па) викликає підвищені зусилля при видиху та може призвести до баротравми легень [6].

Відхилення тиску в масці МФР від заданого значення пов'язано не лише з циклічним впливом дихання людини, але й з не достатнім зусиллям притискання маски до обличчя [7] та нелінійною зміною тиску в масці, що обумовлено властивостями конструктивних елементів респіратора.

Переважає більшість сучасних МФР мають від 2 до 6 рівнів регулювання витрати повітря, які задаються користувачем власноруч. Такий спосіб завдання витрати ґрунтується суто на власних відчуттях людини, щодо потреби у кількості повітря та необхідних зусиллях при диханні. Несвоєчасна зміна витрати повітря до маски респіратора під час вдиху може призвести до потрапляння неочищеного повітря в підмасковий простір крізь нещільності вздовж полоси обтюрації.

Створення системи керування, що враховує особливості функціонування МФР вимагає вдосконалення імітаційної моделі, що у свою чергу потребує

дослідження роботи респіратора у режимі поступового збільшення значення керуючого сигналу.

Для досягнення визначеної мети дослідження, необхідно виконати наступні завдання:

- використовуючи експериментальний зразок для дослідження режимів роботи МФР отримати та проаналізувати динамічну та статичну характеристики;
- вдосконалити імітаційну модель МФР;
- підтвердити адекватність отриманої моделі до об'єкта керування.

Основна частина. Конструкція експериментального зразка для дослідження роботи МФР представлена на рис. 1.

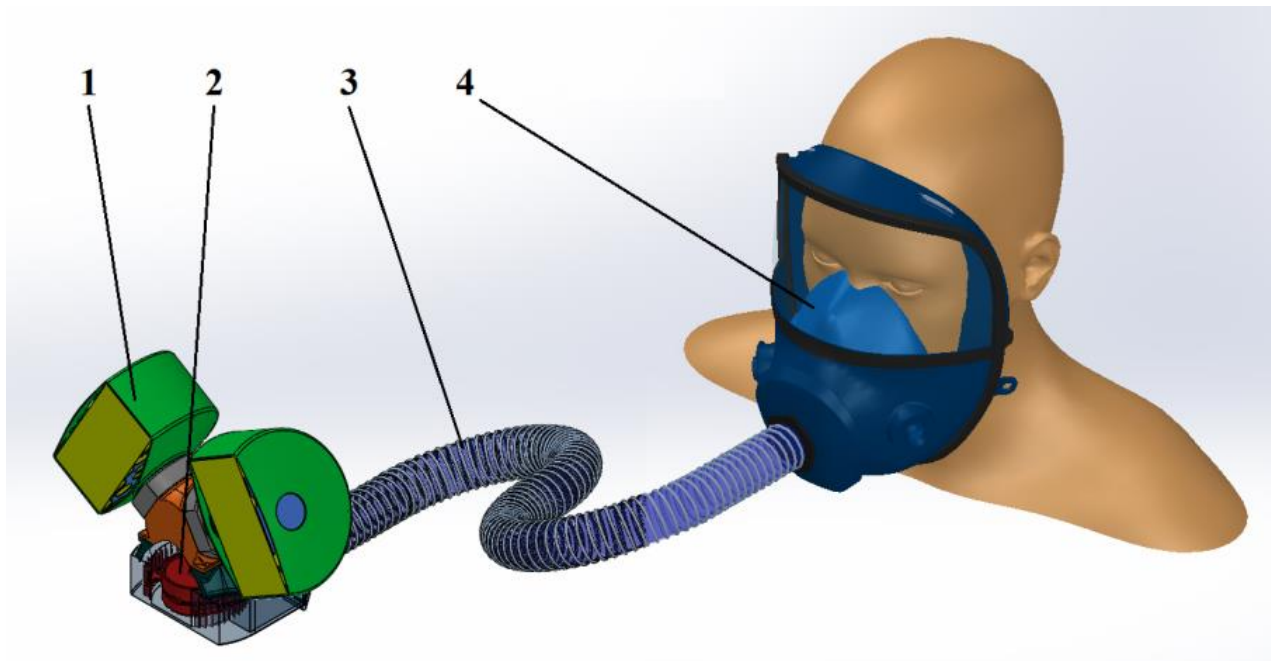


Рис. 1. Конструкція експериментального зразка МФР

Основними параметрами, які контролюються при роботі МФР є тиск в зоні розрідження (між фільтрами (1) та відцентровим вентилятором з крилаткою (2)), надлишковий тиск у панорамній масці (4) та витрата повітря, що проходить через гнучкий повітропровід (3).

В роботі [8] показано, що МФР, як об'єкт керування, є несиметричним і його математична модель описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} T_n \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_n \cdot x(t), \text{ при підйомі;} \\ T_c \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_n \cdot x(t), \text{ при спаді.} \end{cases} \quad (1)$$

Згідно методам, викладеними в [9] було отримано динамічну характеристику експериментального зразка МФР (рис. 2).

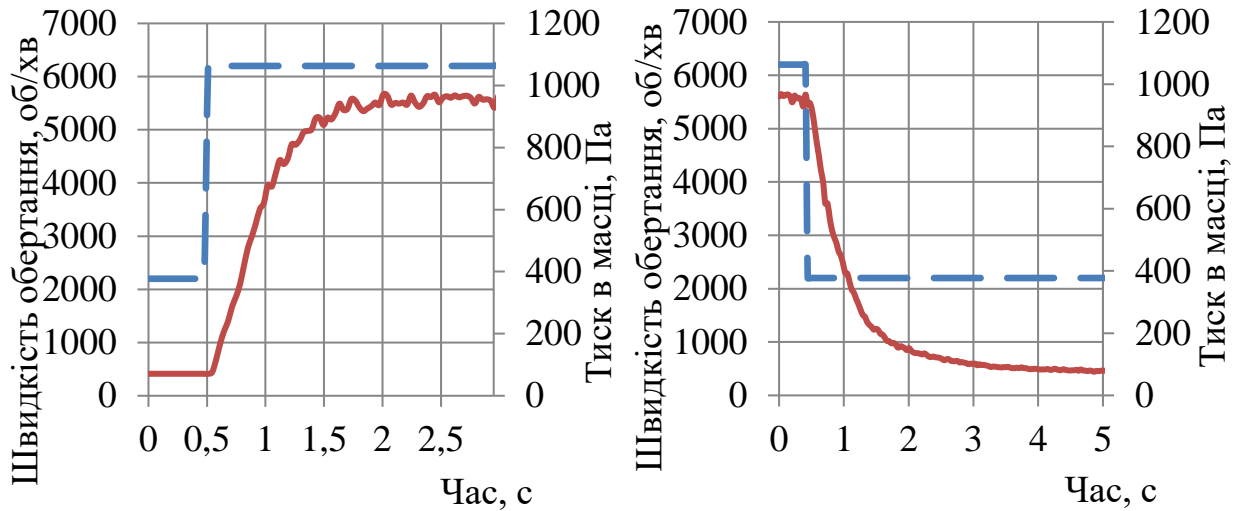


Рис. 2. Динамічні характеристики при підйомі та спаді керуючого впливу

Для отримання передаточних функцій (рис. 3), використано метод Process Models у System Identification Toolbox в Matlab для аперіодичних ланок першого порядку.

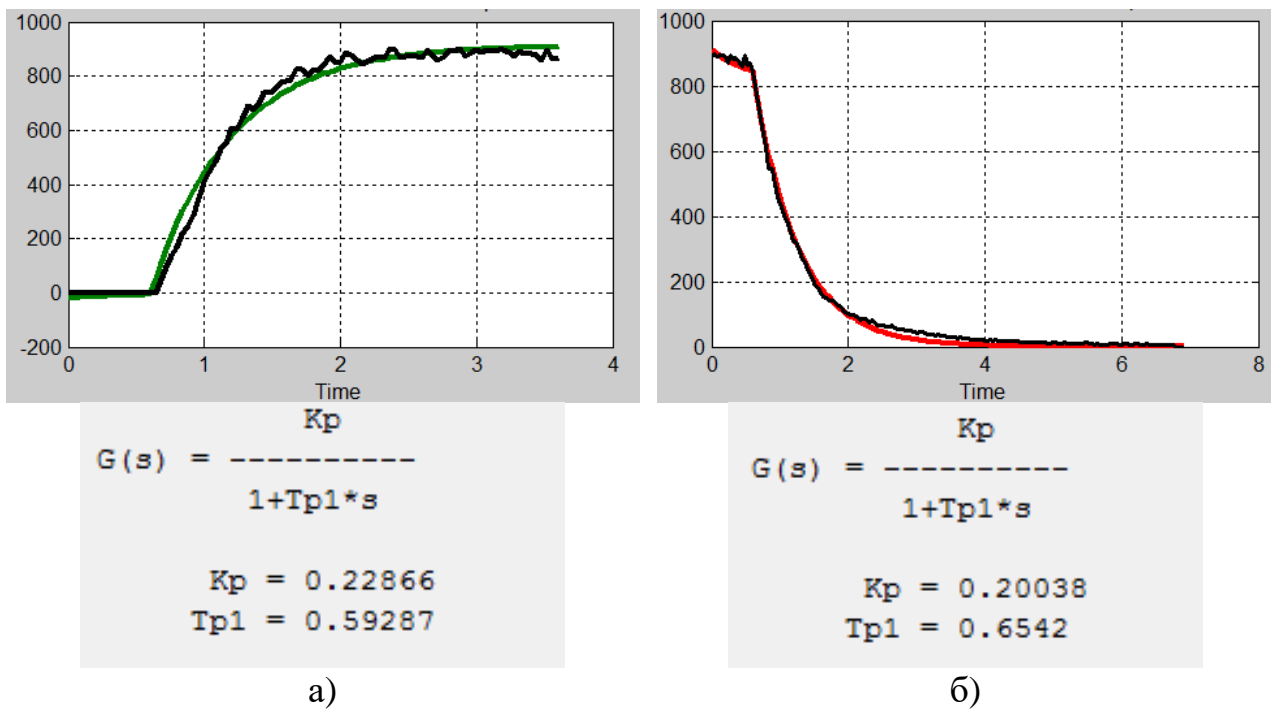


Рис. 3. Передаточні функції при підйомі (а) та спаді (б) тиску повітря в масці МФР

Дані для побудови статичної характеристики (рис. 4) були отримані шляхом послідовного збільшення керуючого сигналу – швидкості обертання вентилятора з кроком 200 об/хв та реєстрації дійсного значення – тиску в масці МФР.

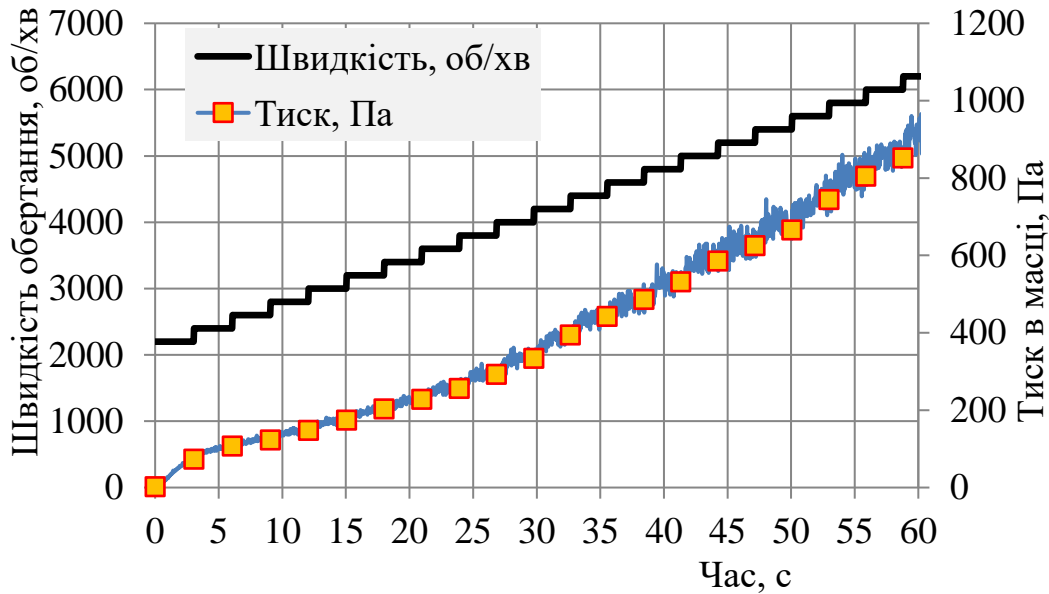


Рис. 4. Дані для побудови статичної характеристики

Аналіз отриманих результатів показав, що статична характеристика МФР у діапазоні 2200-6200 об/хв є нелінійною (рис. 5).

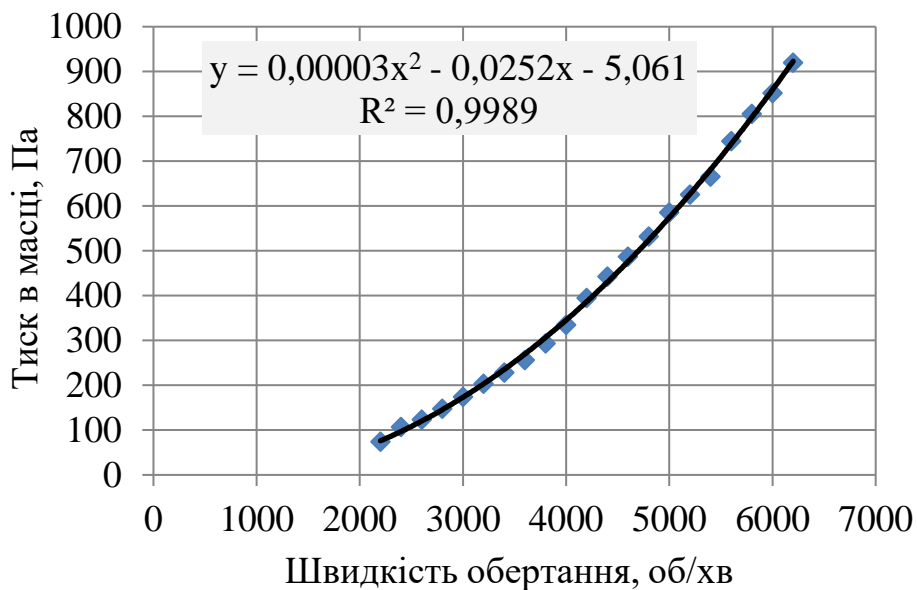


Рис. 5. Статична характеристика МФР

За допомогою поліноміальної апроксимації отримано рівняння, яке описує залежність тиску у масці від швидкості обертання вентилятора:

$$y = 0,00003x^2 - 0,0252x - 5,061, \quad (2)$$

де x – швидкість обертання крилатки вентилятора, об/хв; y – тиск у масці респіратору, Па.

Коефіцієнт детермінації складає 0,99. Це дозволяє зробити висновок, що отримана залежність відповідає статичній характеристиці об'єкта керування.

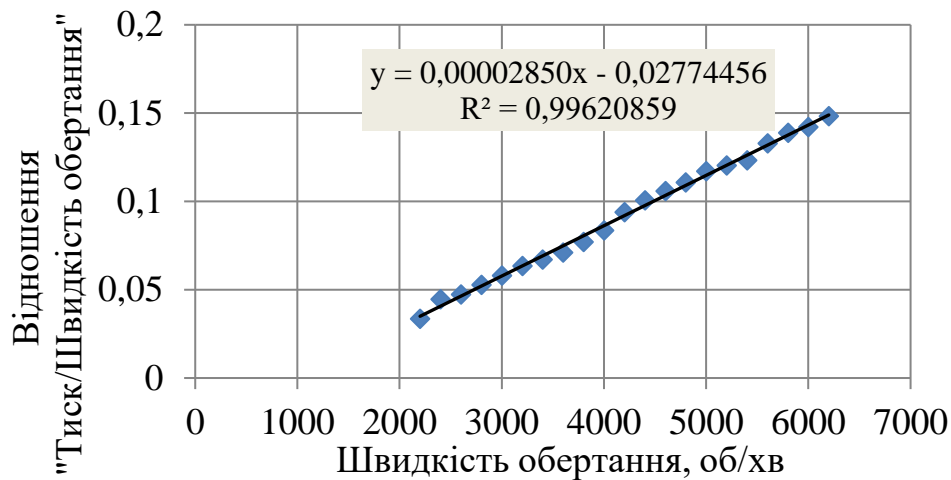


Рис. 6. Залежність відношення коефіцієнта посилення («Тиск/Швидкість обертання») від швидкості обертання крилатки вентилятора

Отримана залежність (див. рис. 6) свідчить, що коефіцієнт посилення лінійно зростає при збільшенні тиску:

$$y = 0,0000285 * x - 0,02774456, \quad (3)$$

де x – швидкість обертання крилатки вентилятора, об/хв; y – відповідний коефіцієнт посилення, Па/(об/хв).

Коефіцієнт детермінації склав 0,99, що дозволяє використати отриману залежність у математичній моделі (1).

Таким чином система рівнянь (1), може бути представлена як:

$$\begin{cases} 0,59287 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 0,0000285 * x(t) - 0,02774456, \text{ при підйомі;} \\ 0,6542 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 0,0000285 * x(t) - 0,02774456, \text{ при спаді.} \end{cases} \quad (4)$$

Враховуючи (4) вдосконалено імітаційну модель МФР, створену в середовищі Matlab за аналогією з [10]. Отримана модель наведена на рисунку 4. Результати графічного порівняння роботи об'єкта керування та імітаційної моделі наведені на рисунку 7.

Перевірка адекватності імітаційної моделі до об'єкта керування виконана за нормованою середньо квадратичною помилкою [11]:

```
>> nrmse = goodnessOfFit(Model, Object, 'NRMSE') * 100.0
nrmse =
92.2635
```

Результати моделювання відповідають експериментальним даним на 92%, що перевищує показник 82%, отриманий у роботі [9].

На підставі загального аналізу процесів вдиху/видиху, графічного порівняння перевірочних даних та статистичного аналізу, встановлено, що отримана імітаційна модель адекватна об'єкту керування у заданому діапазоні тиску.

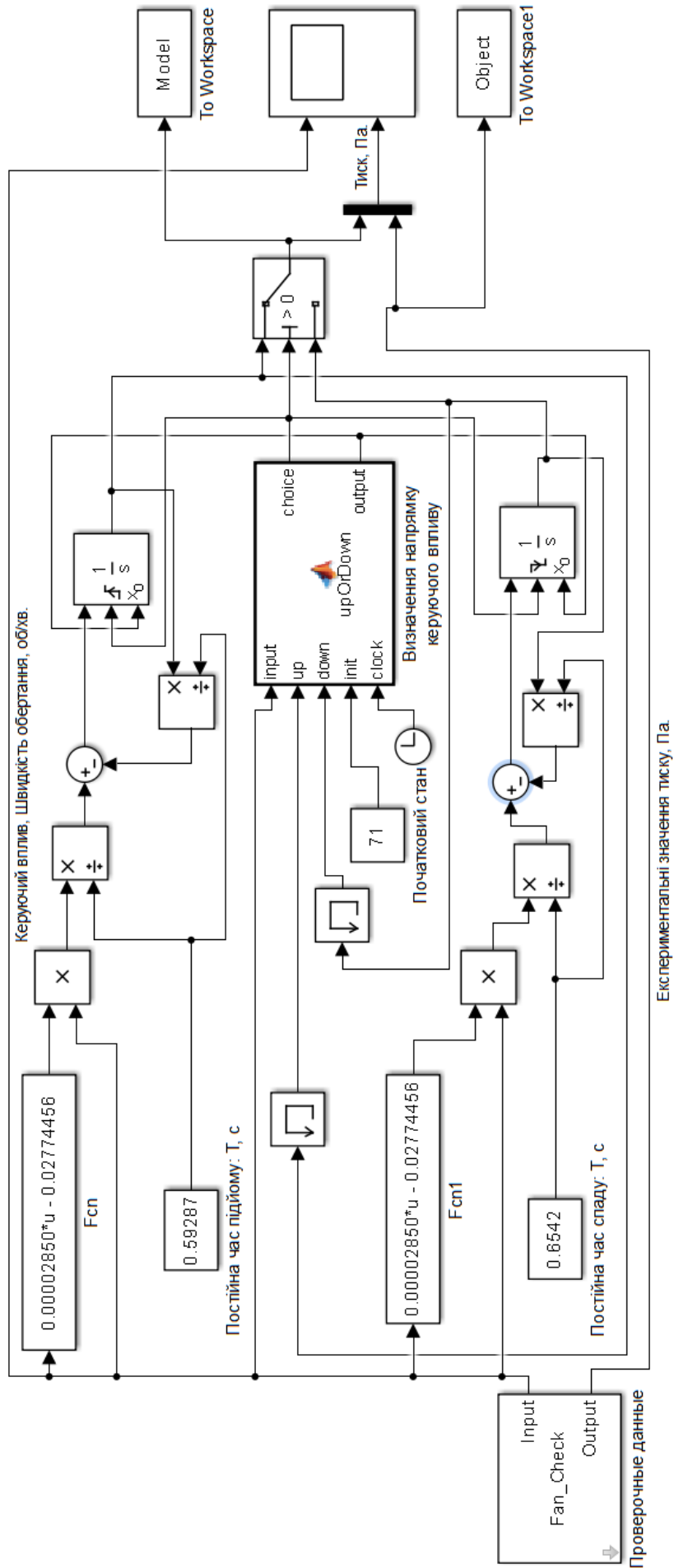


Рис. 7. Імітаційна модель

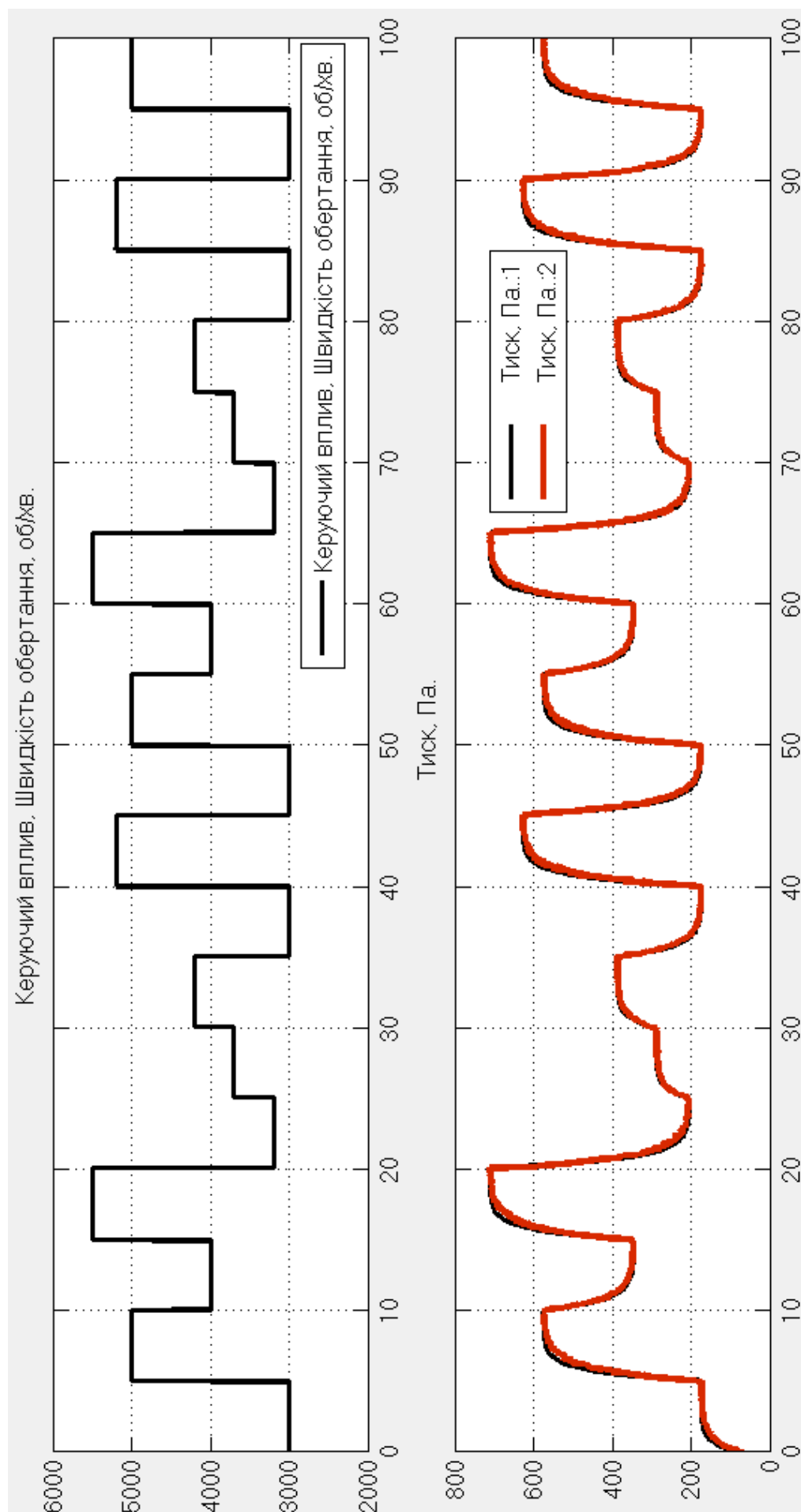


Рис. 8. Результати графічного порівняння роботи об'єкта керування та імітаційної моделі

Висновки. Дослідження показали, що МФР є об'єктом керування, який має несиметричність перехідних характеристик при підйомі та спаді сигналу керування та нелінійну статичну характеристику.

Відношення коефіцієнта посилення «Тиск/Швидкість обертання» лінійно змінюється в залежності від швидкості обертання крилатки вентилятора.

Адекватність вдосконаленої імітаційної моделі до об'єкта керування склала 92%.

Перелік посилань

1. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань за 2022 рік (2023). Фонд соціального страхування України. Статистичні дані. <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/985104>
2. Board on Health Sciences Policy; Institute of Medicine. *The Use and Effectiveness of Powered Air Purifying Respirators in Health Care: Workshop Summary*. (2015). Washington (DC): National Academies Press (US) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK294217/>
3. *Assigned Protection Factors: for the Revised Respiratory Protection Standard*. (2009). OSHA. <https://www.osha.gov/Publications/3352-APF-respirators.html>
4. Licina, A., & Silvers, A. (2021). Use of powered air-purifying respirator(PAPR) as part of protective equipment against SARS-CoV-2-a narrative review and critical appraisal of evidence. *American Journal of Infection Control*, 49(4), 492-499. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.11.009>
5. *Determination of air flow resistance of breath responsive, powered air-purifying respirators (PAPR's) standard testing procedure (STP)*. (2005). National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) <https://www.cdc.gov/niosh/nppt/stps/pdfs/RCT-APR-0065-508.pdf>.
6. Potchileev, I., Doroshenko, M., & Mohammed, A.N. (2023). Positive Pressure Ventilation. *Treasure Island (FL): StatPearls Publishing*; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560916/>
7. Monjezi, M., & Jamaati, H. (2021). The effects of face mask specifications on work of breathing and particle filtration efficiency. *Medical Engineering & Physics*, 98, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2021.10.004>
8. Шаруда, В.Г., Ткачов, В.В., & Бубликов, А.В. (2015). *Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра: навч. посіб.* Національний гірничий університет. <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/146617/CD642.pdf>
9. Slavynskiy, D. (2023). Determination of the model of a powered air-purifying respirator for researching its operational modes. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 72, 172–185. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.172>
10. Лазарев, Ю. Ф. (2011). *Модельовання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник*. НТУУ "КПІ".
11. *Documentation goodness Of Fit. Mathworks. Help Center* (n.d.). <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html>

ABSTRACT

Purpose. Justification of the need to improve the simulated model of the powered air-purifying respirator, substantiating the need for planning and conducting additional experiments. Determination of parameters and confirmation of the adequacy of the simulation model to the object of control – a powered air-purifying respirator.

Methodology. The research was carried out on an experimental setup by means of an active experiment. To obtain a static characteristic, a sequential increase in the control effect – the speed of rotation of the fan in steps of 200 rpm was performed, and the actual value – pressure in the respirator

mask – was recorded. Based on the experimental data, a statistical characteristic was constructed and the dependence of the model amplification factor on the control influence was determined. Verification of the obtained model for adequacy to the control object was performed according to Fisher's adequacy criterion.

Findings. According to the results of the study, it was established that the static characteristic of the powered air-purifying respirator according to the channel "speed of rotation of the fan – pressure in the mask" is close to linear, and the amplification factor depends on the value of the control influence. Based on the analysis of the received data, the simulation model of the powered air-purifying respirator was improved.

Originality. It was established that the static characteristic of the powered air-purifying respirator in the defined range of control influence is non-linear and the amplification factor depends on the speed of rotation of the fan blades.

Practical value. The dependence of the amplification factor on the speed of rotation of the fan blades was determined. Adequacy of the improved simulation model to the control object is 92%. An improved simulation model of a powered air-purifying respirator allows you to perform a study of operating modes in order to determine the requirements for controlling the air supply process to the mask and further synthesis of the control system using various types of regulators.

Keywords: *powered air-purifying respirator, simulation model, research, amplification factor, model quality criteria.*