

Собина В.О., Коломієць В.С., Поліванов О.Г., Соколов Д.Л., Ященко О.А

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИБІР СТРУКТУРИ БЛОКА КОРЕКЦІЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯМ

Управління динамічними властивостями системи управління пожежогасінням здійснюється шляхом реалізації принципу динамічної компенсації інерційних властивостей її функціональних елементів. Побудована структурно-динамічна схема блока корекції системи управління пожежогасінням, яка включає аперіодичні та безінерційні динамічні ланки. Розроблений спрощений варіант структурно-динамічної схеми блока корекції із використанням Раде-апроксимації та мінітах-апроксимації на базі алгоритму Ремеза його передаточної функції.

Ключові слова: система управління пожежогасінням, блок корекції, час гасіння, структурно-динамічна схема.

Постановка проблеми

Одним із напрямків на шляху підвищення ефективності систем пожежогасіння є використання інноваційних рішень при їх побудові. Одним із перспективних рішень є використання сігвеїв в якості бази для побудови мобільних установок пожежогасіння [1]. Ефективність таких установок пожежогасіння закладається на етапі їх проектування і підтримується на етапі їх експлуатації. Однією із проблем при створенні високоефективних систем пожежогасіння є забезпечення наукового обґрунтування при виборі технічного обліку таких систем, а також при його реалізації відповідними засобами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ефективність систем управління пожежогасінням, які включають систему (установку) пожежогасіння та об'єкт управління (пожежу), визначається декількома показниками. В якості одного із основних таких показників використовується час гасіння пожежі [2]. Цей показник визначається, як правило, експериментальним шляхом [3]. В [4] експериментально визначався час гасіння дизпалива та гептану. Аналогічні підходи мають місце при дослідженнях в [5] та в [6]. Всі ці дослідження об'єднує їх локальний характер, тобто результати цих досліджень можуть бути використані для рідин, для яких здійснювалось їх гасіння. Дослідження із розширеним асортиментом рідин, що горять, проводились FM Global та Sandina National Laboratories [7]. Теоретичні методи досліджень стосовно гасіння пожеж класу В пов'язані із використанням методів обчислювальної

гідродинаміки CED [8]. Слід зазначити, що методи досліджень із використанням CED в основному використовуються в лабораторних умовах, а їх точність потребує обґрунтування. Використання аналітичних методів дослідження пожеж при їх гасіння за допомогою систем управління пожежогасінням потребує наявності адекватних математичних моделей. Практично в якості таких моделей використовуються математичні моделі об'єкта управління пожежогасінням – пожежі [9]. Процес гасіння пожежі розглядається як локальна опція, тобто без врахування динамічних властивостей системи (установки) пожежогасіння [10]. Наявність математичних моделей всіх функціональних елементів системи управління пожежогасінням відкриває можливості для створення таких систем із апріорі заданими характеристиками та показниками. Прикладом такого підходу є структурний синтез систем пожежогасіння, який орієнтований на гасіння пожежі класу В розпиленою водою [11]. Апріорі задана величина часу гасіння пожежі забезпечується шляхом динамічної компенсації інерційних властивостей елементів системи пожежогасіння. Але відкритим є питання стосовно технічної реалізації функціонального елемента, який забезпечує цю динамічну компенсацію.

Проведений аналіз дає підстави для проведення досліджень, спрямованих на вибір структури функціонального елемента системи управління пожежогасінням, який забезпечує динамічну компенсацію її інерційних властивостей.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є обґрунтування технічного обліку на структурному рівні для блока корекції

динамічних властивостей системи управління пожежогасінням, яка орієнтована на гасіння пожежі класу В розпиленою водою.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- здійснити структурний синтез блока корекції системи управління пожежогасінням за умови апіорі заданої його передаточної функції;
- із використанням точностного критерію здійснити модифікацію структурно-динамічної схеми блока корекції системи управління пожежогасінням;
- надати рекомендації стосовно технічної реалізації блока корекції системи управління пожежогасінням.

Виклад основного матеріалу

Структурний синтез системи управління пожежогасінням передбачає введення до її складу блока корекції із передаточною функцією [11].

$$W_K(p) = (p^2 + 1,5p + 1)^{-2} \prod_{i=1}^4 (\tau_i p + 1), \quad (1)$$

де τ_i – і-та постійна часу; p – комплексна змінна.

Із (1) витікає, що передаточна функція блока корекції включає два типи динамічних елементів, які мають передаточні функції.

$$W_{K0}(p) = (p^2 + 1,5p + 1)^{-1}; \quad W_{Ki}(p) = \tau_i p + 1. \quad (2)$$

Передаточна функція $W_{K0}(p)$ реалізується за допомогою структурно-динамічної схеми, яка наведена на рис.1.

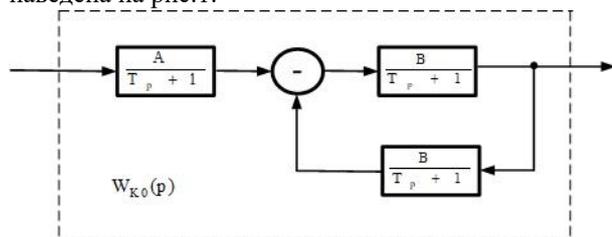


Рис. 1 Структурно динамічна схема динамічного елемента із передаточною функцією $W_{K0}(p)$

Величина параметрів А, В та Т визначаються із використанням виразу для $W_{K0}(p)$, для якої має місце [12]

$$W_{K0}(p) = AB(T^2 p^2 + 2Tp + B^2 + 1)^{-1} = ABT^2 [p^2 + 2T^{-1}p + (1 + B^2)T^{-2}]^{-1}. \quad (3)$$

Із порівняння (2) та (3) витікає, що

$$ABT^{-2} = 1; \quad 2T^{-1} = 1,5; \quad (1 + B^2)T^{-1} = 1, \quad (4)$$

внаслідок чого

$$T = 1,33 \text{ с}; \quad A = 2,02 \text{ с}^2; \quad B = 0,88. \quad (5)$$

Для реалізації передаточної функції $W_{Ki}(p)$ використовується структурно-динамічна схема, яка наведена на рис.2.

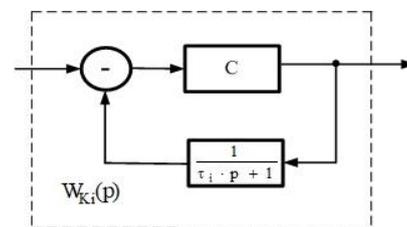


Рис. 2 Структурно-динамічна схема динамічного елемента із передаточною функцією $W_{Ki}(p)$

Цій структурно-динамічній схемі відповідає передаточна функція

$$W_{Ki}(p) = C(\tau_i p + 1)(\tau_i p + 1 + C)^{-1}, \quad (6)$$

яка за умови, що $C \gg 1,0$ трансформується до вигляду

$$W_{Ki}(p) = \tau_i p + 1. \quad (7)$$

Структурно-динамічна схема блока корекції із передаточною функцією (1) представляє послідовне з'єднання двох динамічних елементів із передаточними функціями $W_{K0}(p)$ та чотирьох динамічних елементів із передаточними функціями $W_{Ki}(p)$, для яких $\tau_1 = 0,3 \text{ с}$; $\tau_2 = 0,8 \text{ с}^2$; $\tau_3 = 1,2 \text{ с}$ та $\tau_4 = 10,0 \text{ с}$. Структурно-динамічна схема наведена на рис. 3.

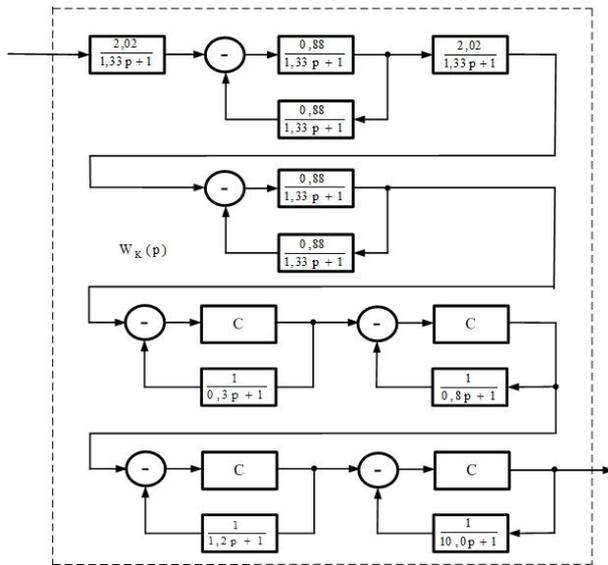


Рис.3 Структурно динамічна схема блока корекції

Технічна реалізація блока корекції може бути здійснена із використанням елементів R та C, а також за допомогою операційних підсилювачів. Для такої технічної реалізації необхідно 14 операційних підсилювачів, 34 резистори та 10 конденсаторів.

В якості операційних підсилювачів можуть бути використані підсилювачі серій К140УД, К153УД або К553УД.

Технічна реалізація блоку корекції може бути спрощена, якщо може бути знижений порядок поліномів передаточної функції $W_K(p)$ внаслідок її апроксимації. Розглянемо такий підхід із використанням Раде-апроксимації та мінімакс-апроксимації на основі алгоритму Ремеза [13].

При апроксимації передаточної функції $W_K(p)$ будемо розглядати передаточні функції із порядком поліномів Гурвіца, який не перевищує трьох. При Раде-апроксимації мінімальній похибці розбіжності відповідає передаточна функція, яка має вигляд

$$W_{Kp}(p) = (1,95p^3 + 15,39p^2 + 11,52p + 1) \times (0,91p^3 + 2,34p^2 + 2,22p + 1)^{-1} \quad (8)$$

При використанні мінімакс-апроксимації мінімальну похибку апроксимації має передаточна функція, яка описується виразом

$$W_{Km}(p) = (3,38p^2 + 10,64p + 1) \times (0,007p^3 + 1,09p^2 + 1,14p + 1)^{-1} \quad (9)$$

На рис.4 наведені залежності для похибок розбіжності між передаточними функціями $W_K(p)$ і $W_{Kp}(p) - \delta_p(p)$ та між передаточними функціями $W_{Kp}(p)$ і $W_{Km}(p) - \delta_m(p)$.

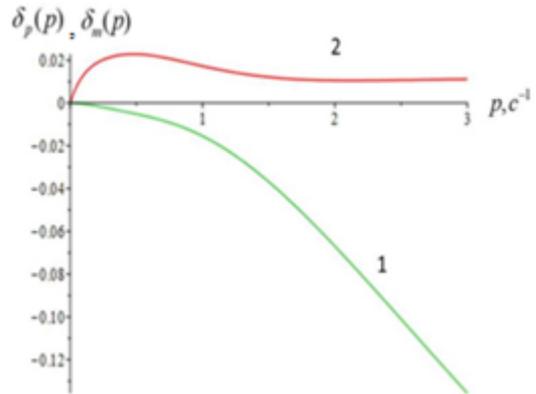


Рис. 4. Похибка розбіжності: 1 - $\delta_p(p)$; 2- $\delta_m(p)$

Слід зазначити, що $p \in [0,2]$ внаслідок чого має місце $\delta_{pmax}(p) = 6,7\%$; $\delta_{mmax} = 2,1\%$, тобто при виборі передаточної функції, яка є апроксимацією передаточної функції $W_K(p)$ перевагу слід віддати виразу (9).

Поліном Гурвіца $G(p)$ цієї передаточної функції можна переписати наступним чином [14]

$$G(p) = 0,007 \prod_{i=1}^3 (p - p_i), \quad (10)$$

де p_i - і-й корінь рівняння.

$$G(p) = 0. \quad (11)$$

Для передаточної функції (9) має місце

$$p_1 = 1,38c^{-1}; p_{2,3} = (-0,6 \pm j0,66)c^{-1}, \quad (12)$$

де j - уявна одиниця.

Після об'єднання (9), (10) та (12) вираз для $W_{Km}(p)$ приймає наступний вигляд

$$W_{Km}(p) = 129,4(3,38p^2 + 10,64p + 1) \times [(0,72p + 1)(1,25p^2 + 1,5p + 1)]^{-1} \quad (13)$$

Ця передаточна функція включає три типи динамічних елементів із передаточними функціями

$$\begin{aligned} W_{Km0}(p) &= (1,25p^2 + 1,5p + 1)^{-1}; \\ W_{Km1}(p) &= (0,72p^2 + 1)^{-1}; \\ W_{Km2}(p) &= p. \end{aligned} \quad (14)$$

Структурно передаточна функція $W_{Km0}(p)$ реалізується аналогічно передаточній функції $W_{K0}(p)$ згідно рис. 1. Для передаточної функції $W_{Km0}(p)$

$$T = 1,67 \text{ с}; A = 2,0 \text{ с}^2; B = 1,1. \quad (15)$$

Для реалізації передаточної функції $W_{Km2}(p)$ використовується структурно-динамічна схема, яка наведена на рис. 5

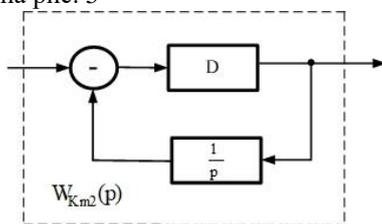


Рис.5 Структурно динамічна схема динамічного елемента із передаточною функцією $W_{Km2}(p)$

Цій структурно-динамічній схемі відповідає передаточна функція

$$W_{Km2}(p) = Dp(p + D)^{-1}. \quad (16)$$

Яка за умови, що $D \gg 1,0$, трансформується до вигляду

$$W_{Km2}(p) = p. \quad (17)$$

Структурно-динамічна схема блока корекції із передаточною функцією (13) наведена на рис. 6

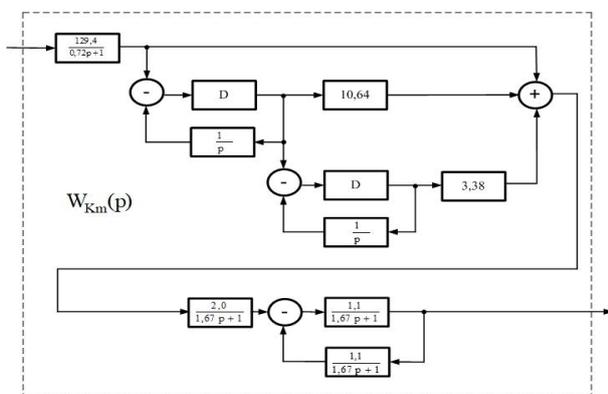


Рис.6 Модифікована структурно динамічна схема блока корекції

Для технічної реалізації такої схеми необхідно 10 операційних підсилювачів, 21 резистор та 6 конденсаторів.

Слід відмітити, що при визначенні часу гасіння пожежі класу В із використанням системи управління пожежогасінням, до складу якої входить блок корекції із передаточною функцією (1) або блок корекції із передаточною функцією (13), величина похибки розбіжності не перевищує 0,6%.

Висновки

1. Здійснено структурний синтез блока корекції системи управління пожежогасінням пожежі класу В розпиленою водою. Результатом такого структурного синтезу є побудова структурно-динамічної схеми блока корекції, яка базується на використанні двох базових передаточних функцій. Для реалізації однієї базової передаточної функції використовуються аперіодичні динамічні ланки, а для реалізації другої базової передаточної функції використовуються безінерційна та аперіодична ланки.

2. Побудована модифікована структурно-динамічна схема блока корекції системи управління пожежогасінням, в основі якої лежить апроксимація передаточної функції цього блока корекції. Для такої опції використана Раде-апроксимації та мінітах-апроксимація на основі алгоритму Ремеза. Показано, що похибка апроксимації передаточної функції блока корекції із використанням мінітах-апроксимації на основі алгоритму Ремеза не перевищує 2,1%, що в три рази менше, ніж при використанні Раде-апроксимації. Реалізація модифікованої структурно-динамічної схеми блока корекції здійснюється на використанні трьох базових передаточних функцій, до складу яких входять без інерційні та аперіодичні ланки.

3. Показано, що для технічної реалізації блока корекції системи управління пожежогасінням пожежі класу В розпиленою водою можуть бути використані операційні підсилювачі серій К140УД, К153 УД або К553 УД та R і C елементи. Для технічної реалізації модифікованої структурно-динамічної схеми блока корекції використовується в 1,5 рази менше елементів відносно базової структурно-динамічної схеми.

Література

1. *Абрамов Ю.О., Собина В.О., Сошинський О.І. Еволюція автономних мобільних засобів пожежогасіння/ Комунальне господарство міст. Вип. 177. Т.3. 2023. С. 147-152. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-384-389>*
2. *Котов А.Г. Пожежогасіння та системи безпеки. Київ. 2003. 270 с.*
3. *Liu, Y., Chen, P., Fu, Z., Li, J., Sun, R., Zhai, X. The investigation of the water mist suppression pool fire process's flame expansion characteristics // Journal of Loss Prevention*

in the Process Industries. 2023. Vol. 81. P. 104927. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104927>

4. Shrigondekar, H., Chowdhury, A. Prabhu, S.V. Performance by Various Water Mist Nozzles in Extinguishing Liquid Pool Fires // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57 (5) P. 2553–2581 Doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01130-0>.

5. Jeong, C.S., Lee, C.Y. Experimental investigation on spray characteristics of twin-fluid nozzle for water mist and its heptane pool fire extinguishing performance // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 148. P.724-736. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.037>.

6. Liu, T., Yin, X., Liu, Y., Tang, Y., Huang, A., Dong, X., Liu, Y. Influence of Water Mist Temperature Approach on Fire Extinguishing Effect of Different Pool Fires. // *Processes* 2022, Vol. 10 (8). P. 1549. Doi: <https://doi.org/10.3390/pr10081549>

7. Ditch B. D., de Ris J.L., Blanchat T. K., Chaos M., Bill R. G., Dorofeev S.B. Pool fires – An empirical correlation // *Combustion and Flame*. 2013, Vol. 160 (12). P. 2964-2974 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.06.020>

8. Dasgotra A., Rangarajan G., Tauseef S.M. CFD-based study and analysis on the effectiveness of water mist in interacting pool fire suppression // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 152. P.614-629. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.033>

9. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні властивості води в пожежній справі. Харків. 2004.252 с.

10. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежозахисної безпеки. Харків. 2006.395 с.

11. Абрамов, Ю.О., Коломієць, В.С., Собина В.О. Структурний синтез мобільної пожежної установки для гасіння пожеж класу В / *Комунальне господарство міст*. Вип. 185. Т. 4. 2024. С. 153–158. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-153-158>

12. Артюшин Л.М., Дурняк Б.В., Машиков О.А., Плащенко Д.М., Теоретичні основи технічної кібернетики. Львів. 2004. 130 с.

13. Абрамов Ю.О., Коломієць В.С., Собина В.О. Моделі гасіння пожежі при горінні горючої рідини / *Комунальне господарство міст*. Вип. 178. Т. 4. 2023. С. 194–198. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-194-198>

14. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematikal handbook for scientists and engineers*. New York. 2000. 1130 p.

References

1. Abramov Yu.O., Sobyna V.O., Soshynskyi O.I. *Evolutsiia avtonomnykh mobilnykh zasobiv pozhezhohasinnia / Komunalne hospodarstvo mist*. Vyp. 177. T.3. 2023. S. 147-152. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-384-389>

2. Kotov A.H. *Pozhezhohasinnia ta systemy bezpeky*. Kyiv. 2003. 270 s. Liu, Y., Chen, P., Fu, Z., Li, J., Sun, R., & Zhai, X. (2023). The investigation of the water mist suppression pool fire process's flame expansion characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023. Vol. 81, P. 104927. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104927>

3. Shrigondekar, H., Chowdhury, A. & Prabhu, S.V. Performance by Various Water Mist Nozzles in Extinguishing Liquid Pool Fires. *Fire Technol* 57, 2553–2581 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01130-0>.

4. Jeong, C.S., Lee, C.Y.. Experimental Investigation on Spray Characteristics of Twin-fluid Nozzle for Water Mist and Its Heptane Pool Fire Extinguishing Performance // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol.

148. P.724-736. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.037>.

5. Liu, T., Yin, X., Liu, Y., Tang, Y., Huang, A., Dong, X., Liu, Y. Influence of Water Mist Temperature Approach on Fire Extinguishing Effect of Different Pool Fires. // *Processes* 2022, Vol. 10 (8). P. 1549. Doi: <https://doi.org/10.3390/pr10081549>

6. Ditch B. D., de Ris J.L., Blanchat T. K., Chaos M., Bill R. G., Dorofeev S.B. Pool fires – An empirical correlation// *Combustion and Flame*. 2013, Vol. 160 (12). P. 2964-2974 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.06.020>

7. Dasgotra A., Rangarajan G., Tauseef S.M. CFD-based study and analysis on the effectiveness of water mist in interacting pool fire suppression. *Process Safety and Environmental Protection*. V.152.2021.P.614-629. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.033>

8. Tarakhno O.V. Sharshanov A.Ia. *Fizyko – khimichni vlastyivosti vody v pozhezhnii spravi*. Kharkiv. 2004.252 s.

9. Tarakhno O.V. *Teoretychni osnovy pozhezhovybukhonebezpeky*. Kharkiv. 2006.395 s.

10. Abramov, Yu.O., Kolomiets, V.S., Sobyna, V.O. *Strukturnyi syntez mobilnoi pozhezhnoi ustanovky dlia hasinnia pozhezh klasu V*. Yu.O. Abramov, V.S. Kolomiets, V.O. Sobyna. *Komunalne hospodarstvo mist*. Vyp. 185. T. 4. 2024., s. 153–158. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-153-158>

11. Abramov, Yu.O., Kolomiets, V.S., Sobyna V.O. *Strukturnyi syntez mobilnoi pozhezhnoi ustanovky dlia hasinnia pozhezh klasu B / Komunalne hospodarstvo mist*. Vyp. 185. T. 4. 2024. S. 153–158. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-153-158>

12. Artiushyn L.M., Durniak B.V., Mashkov O.A., Plashchenko D.M., *Teoretychni osnovy tekhnichnoi kibernetiky*. Lviv. 2004. 130 s.

13. Abramov Yu.O., Kolomiets V.S., Sobyna V.O. *Modeli hasinnia pozhezh pry horinni horiuchoi ridyny / Komunalne hospodarstvo mist*. Vyp. 178. T. 4. 2023. S. 194–198. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-194-198>

14. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematikal handbook for scientists and engineers*. New York. 2000. 1130 p.

Рецензент: д.т.н., професор, головний науковий співробітник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру О.Є. Басманов, Національний університет цивільного захисту України, Україна

Автор: СОБИНА Віталій Олександрович кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації і проведення аварійно – рятувальних робіт

Національний університет цивільного захисту України

E mail - sobol_84@ukr.net

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6908-8037>

Автор: КОЛОМІЄЦЬ Валерій Станіславович старший викладач кафедри організації і проведення аварійно-рятувальних робіт

Національний університет цивільного захисту України

E-mail - kolomiets_valerii@nuczu.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4058-4026>

Автор: ПОЛІВАНОВ Олександр Геннадійович
 доктор філософії, доцент кафедри інженерної та аварійно – рятувальної техніки
 Національний університет цивільного захисту України
 E-mail - polivanov_oleksandr@nuczu.edu.ua
 ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6396-1680>

E-mail - firesokol1995@ukr.net
 ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7996-689X>

Автор: СОКОЛОВ Дмитро Львович
 кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації і проведення аварійно – рятувальних робіт
 Національний університет цивільного захисту України

Автор: ЯЩЕНКО Олександр Анатолійович
 кандидат економічних наук, доцент, заступник начальника кафедри управління у сфері цивільного захисту
 Національний університет цивільного захисту України
 E-mail - malahay1984@gmail.com
 ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-389X>

CHOOSING THE STRUCTURE OF THE FIRE FIGHTING CONTROL SYSTEM CORRECTION BLOCK

V. Sobyna., V. Kolomiets., O. Polivanov., D. Sokolov., O. Yashchenko.

National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

The object of the research is a fire extinguishing control system for class B fires using water mist. The subject of the research is the process of controlling the dynamic properties of the fire extinguishing control system. Control of the dynamic properties of the fire extinguishing control system is carried out by implementing the principle of dynamic compensation of the inertial properties of its functional elements.

A structural-dynamic diagram of the correction block of the fire extinguishing control system has been developed, which includes aperiodic and non-inertial dynamic links. A simplified version of the structural-dynamic diagram of the correction block was developed using Pade approximation and minimax approximation based on the Remez algorithm for its transfer function.

The approximation of the transfer function of the correction block of the fire extinguishing control system was performed under the condition that the degree of the Hurwitz polynomial equals three. The approximation error using the Pade approximation does not exceed 6.7%, while when using the minimax approximation, the approximation error of the transfer function does not exceed 2.1%.

Recommendations are provided regarding the technical implementation of the correction block of the fire extinguishing control system. The technical implementation of the correction block of the fire extinguishing control system includes the use of 10 operational amplifiers, 21 resistors, and 6 capacitors.

It is shown that when determining the extinguishing time of a class B fire using a fire extinguishing control system that includes a correction block with a modified transfer function, the discrepancy error does not exceed 0.6% relative to the initial expression of the transfer function.

It is shown that for the technical implementation of the correction unit of the fire extinguishing control system for class B fires with sprayed water, the operational amplifiers proposed in the article and R and C elements can be used. For the technical implementation of the modified structural-dynamic scheme of the correction unit, 1.5 times fewer elements are used compared to the basic structural-dynamic scheme.

Key words: fire extinguishing control system, correction unit, extinguishing time, structural-dynamic diagram

Дата надходження статті: 16.01.2026

Дата прийняття до друку: 14.03.2026

Дата публікації статті: 23.03.2026

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.