

Ю.О. Абрамов, В.С. Коломієць, В.О. Собина

Національний університет цивільного захисту України, Україна

МОДЕЛІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ПРИ ГОРІННІ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ

Процес гасіння горючої рідини, що горить, описується передаточною функцією в класі ірраціональних функцій комплексного аргументу. Спрощення структури передаточної функції здійснюється переходом до дрібно-раціональних функцій за допомогою мінімаксної апроксимації із використанням алгоритму Ремеза. Із використанням методу невизначених коефіцієнтів побудована передаточна функція у вигляді суперпозиції передаточних функцій аперіодичних ланок.

Ключові слова: горюча рідина, гасіння пожежі, розпилена вода, передаточна функція.

Постановка проблеми

Системи автоматичного пожежогасіння мають стійку тенденцію до їх все більшого використання. Це обумовлено тим що:

- системи автоматичного пожежогасіння забезпечують виявлення небезпечних чинників пожежі на відміну від оперативних підрозділів ДСНС;

- в системах автоматичного пожежогасіння технічні засоби, що забезпечують доставку вогнегасних речовин до пожежі, апріорі розташовуються на цьому об'єкті;

- при функціонуванні автоматичних систем пожежогасіння повністю виключається дія суб'єктивного фактору.

Подальший розвиток таких систем пожежогасіння пов'язаний із поглибленим вивченням і відповідною формалізацією процесів, які мають місце в їх об'єкті управління – пожежі. Розгляд пожежі як об'єкта управління автоматичної системи пожежогасіння потребує нових підходів до математичного опису таких об'єктів. Одним із таких рішень є розповсюдження методів теорії автоматичного управління для побудови математичних моделей систем автоматичного пожежогасіння та їх елементів. До числа проблем при такому підході слід віднести можливість появи ірраціонального фактору в структурі математичної моделі пожежі, що суттєво обмежує її використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

При розгляді гасіння пожеж розпиленою водою, як правило, в якості математичного опису використовуються статичні моделі. Такі моделі носять емпіричний або ілюстративний характер і в своїй більшості представляють функціональну залежність часу гасіння пожежі від параметрів пожежі та вогнегасної речовини [1]. В ряді випадків

такий тип математичних моделей визначає залежність критичного значення інтенсивності подачі розпиленої води до осередку горіння від його параметрів [2]. Прикладом динамічних математичних моделей пожеж при їх гасінні, зокрема, розпиленою водою є моделі, наведені в [3]. Ці математичні моделі представляють собою звичайні диференційні рівняння, що витікають із рівняння теплового балансу. Математичну базу для формалізації процесів гасіння пожеж складають рівняння тепло- і масопереносу [4], які є диференційними рівняннями в часткових похідних. Розгляд пожежі при її гасінні як об'єкта із розподіленими змінними обумовлює труднощі при вирішенні диференційних рівнянь [5], які можуть бути послаблені за рахунок спрощення математичного опису [6] або за рахунок використання інтегральних перетворень. Внаслідок того, що пожежа при її гасінні є об'єктом управління системи автоматичного управління, її математичний опис доцільно здійснювати із використанням інтегрального перетворення Лапласа [7]. Але в цьому випадку моделі пожежі представляють ірраціональні функції комплексної змінної, що звужує область їх використання.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення досліджень спрямованих на позбавлення ірраціональності в математичних моделях пожеж при їх гасінні розпиленою водою.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова математичних моделей пожеж при горінні горючої рідини на етапі їх гасіння розпиленою водою, які належать класу дрібно-раціональних функцій комплексної змінної.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- здійснити мінімаксну апроксимацію на основі алгоритму Ремеза передаточної функції пожежі при її гасінні розпиленою водою;

- із використанням метода невизначених коефіцієнтів здійснити перехід від передаточних функцій пожежі при її гасіння розпиленою водою, представлених у вигляді дрібно-раціональних функцій комплексного аргументу, до суперпозиції передаточних функцій елементарних динамічних ланок;

- одержати оцінки похибок розбіжності між ірраціональними математичними моделями пожежі при її гасінні розпиленою водою та апроксимованими математичними моделями.

Виклад основного матеріалу

Процес гасіння пожежі розпиленою водою, яка має місце при горінні горючої рідини, згідно [6] описується диференціальним рівнянням у безрозмірній формі

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

із початковими та граничними умовами

$$\theta(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial x} = -\frac{raKI}{V\lambda(T_k - T_0)}, \quad (2)$$

де $\theta = (T_k - T)(T_k - T_0)$; T – температура горючої рідини; T_k, T_0 – температура кипіння горючої рідини та температура навколишнього середовища відповідно; r – теплота випаровування води; a, λ – коефіцієнт температуропровідності та теплопровідності горючої рідини відповідно; K – коефіцієнт використання розпиленої води; V – лінійна швидкість розповсюдження полум'я; I – інтенсивність подачі розпиленої води; $t = V^2 a^{-1} t_p$ – безрозмірний час; t_p – розмірний час; $x = Va^{-1} z$ – безрозмірний координата, z – розмірна координата вздовж нормалі до поверхні горючої рідини.

Якщо розглядати гасіння горючої рідини розпиленою водою як функціонування об'єкта управління в системі пожежогасіння, то такому динамічному елементу буде відповідати передаточна функція [8].

$$W(p) = \theta(p) I^{-1}(p) = \frac{raK}{v\lambda(T_k - T_0)} [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1}, \quad (3)$$

де $\theta(p), I(p)$ – зображення по Лапласу від безрозмірної температури $\theta(0, t)$ та від інтенсивності подачі розпиленої води $I(t)$ відповідно; p – комплексна змінна.

Функція (3) є ірраціональною функцією аргументу p , що обумовлює суттєві труднощі при її використанні в межах класичної теорії автоматичного управління. Одним із варіантів виходу із цієї ситуації є здійснення апроксимації ірраціональної функції $W(p)$ дрібно-раціональною функцією.

Апроксимації підлягає функція $q(p)$, яка має вигляд

$$q(p) = [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1}. \quad (4)$$

Апроксимацією цієї функції є функція $q(m, n)$, яка описується виразом

$$q(m, n) = \left[\sum_{i=0}^m a_i p^i \right] \left[\sum_{j=0}^n b_j p^j \right]^{-1}; \quad m < n, \quad (5)$$

де a_i, b_j – коефіцієнти апроксимації, що підлягають визначенню.

Максимальне значення порядку n полінома Гурвіца обирається за умови забезпечення стійкості. У відповідності із критерієм Гурвіца необхідно, щоб виконувались умови

$$b_j > 0, \quad j = \overline{0, n}. \quad (6)$$

В табл.1 наведені значення коефіцієнтів a_i та b_j , які одержані для трьох функцій $q(m, n)$ у відповідності із методом мінімаксної апроксимації, де реалізований алгоритм Ремеза.

Таблиця 1
Значення параметрів апроксимації

i, j	q(1,2)		q(2,3)		q(3,4)	
	a_i	b_j	a_i	b_j	a_i	b_j
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	0,42	1,27	1,40	2,48	2,11	3,16
2		0,054	0,13	0,68	0,74	2,11
3				0,01	0,032	0,21
4						0,002

На рис.1 наведені залежності для похибок розбіжності $\delta(m, n)$ між функцією $q(p)$ та функціями $q(m, n)$ із параметрами відповідно табл. 1.

Із цих залежностей витікає, що найбільша похибка має місце для апроксимаційної функції $q(1,2)$ – 3,6 %, а найменша – для апроксимаційної функції $q(3,4)$ – 1,5 %.

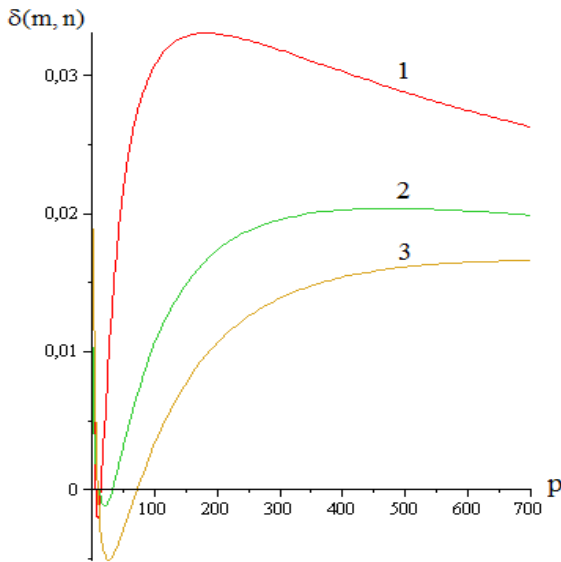


Рис. 1. Залежності похибок розбіжності між функціями $q(p)$ та $q(m, n)$: 1 – для $q(1,2)$; 2 – для $q(2,3)$; 3 – $q(3,4)$

Із цих залежностей витікає, що найбільша похибка має місце для апроксимаційної функції $q(1,2)$ – 3,6 %, а найменша – для апроксимаційної функції $q(3,4)$ – 1,5 %.

Вирази для функції $q(m, n)$ можна переписати наступним чином

$$\begin{aligned}
 q(m, n) &= \left[\sum_{i=0}^m a_i p^i \right] \left[\sum_{j=0}^n b_j p^j \right]^{-1} = \\
 &= \left[\sum_{i=0}^m a_i p^i \right] \left[b_n \prod_{k=1}^n (p - p_k) \right]^{-1} = \\
 &= \sum_{k=1}^n A_k (p - p_k)^{-1}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

де p_k – корені характеристичного рівняння Гурвіца; A_k – параметри, значення яких визначаються рішеннями системи рівнянь

$$\sum_{k=1}^n A_k \prod_{k=1}^n (p - p_k) = \sum_{i=0}^m a_i p^i. \quad (8)$$

При $\tau_k = -p_k^{-1}$, $B_k = A_k \tau_k$ вираз (7) трансформується до вигляду

$$q(m, n) = \sum_{k=1}^n B_k (\tau_k p + 1)^{-1}, \quad (9)$$

в якому τ_k – k -та постійна часу, а B_k – k -й коефіцієнт передачі.

В термінах технічної кібернетики вираз (9) формалізує паралельне з'єднання n аперіодичних ланок із параметрами B_k та τ_k [9]. В табл. 2 наведені значення параметрів B_k та τ_k для функцій $q(2,3)$ та $q(3,4)$

Таблиця 2

Значення параметрів B_k та τ_k

k	q(2,3)		q(3,4)	
	B_k	τ_k	B_k	τ_k
1	0,192	0,017	0,131	0,009
2	0,379	0,360	0,216	0,130
3	0,938	1,960	0,360	0,699
4			0,243	2,439

Вираз (9) дозволяє дуже просто визначити реакцію пожежі при її гасінні розпиленою водою на характер інтенсивності її подачі та інші параметри та характеристики процесу гасіння. Зокрема, при подачі розпиленої води, інтенсивність якої змінюється у відповідності із виразом

$$I(t) = I_0 l(t), \quad (10)$$

де $I_0 = \text{const}$; $l(t)$ – функція Хевісайда, для температури поверхні горючої рідини має місце

$$\theta_n(t) = DL^{-1} \left[\sum_{k=1}^n B_k [p(\tau_k p + 1)]^{-1} \right], \quad (11)$$

В цьому виразі L^{-1} – оператор зворотного перетворення Лапласа; D – параметр

$$D = \text{ra} K I_0 [V \lambda (T_k - T_0)]^{-1}. \quad (12)$$

Якщо врахувати співвідношення

$$\sum_{k=1}^n B_k = 1,0, \quad (13)$$

то вираз (11) трансформується наступним чином

$$\theta_n(t) = D \left[1 - \sum_{k=1}^n B_k \exp(-t \tau_k^{-1}) \right]. \quad (14)$$

В термінах технічної кібернетики цей вираз є перехідною функцією пожежі при її гасінні розпиленою водою.

Для моделі пожежі при її гасінні розпиленою водою у вигляді (3) температура за умови (10) має опис у вигляді [8]

$$\begin{aligned} \theta_0(t) &= DL^{-1} \left[p \left[0,5 + (p + 0,25)^{0,5} \right]^{-1} \right] = \\ &= D \left[1 + \left(\frac{t}{\pi} \right)^{0,5} \exp(-0,25t) - \right. \\ &\quad \left. - (1 + 0,5t) \operatorname{erfc}(0,5t^{0,5}) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 2 наведені залежності для відносних похибок розбіжності $\Delta_n(t)$ між функцією (15) та функціями (14) із параметрами відповідно табл. 2

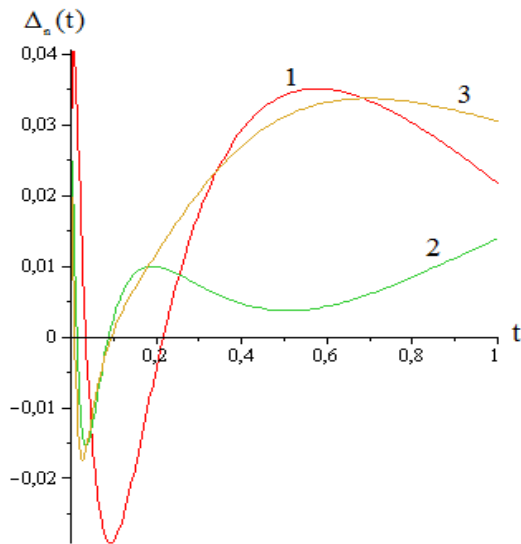


Рис. 2. Залежності похибок розбіжності між функціями $\theta_0(t)$ та $\theta_n(t)$: 1 – для $\theta_1(t)$; 2 – для $\theta_2(t)$; 3 – для $\theta_3(t)$

Із аналізу цих залежностей витікає, що максимальна величина похибки розбіжності не перевищує 4,0%, що відповідає другому порядку полінома Гурвіца в передаточній функції (5). При використанні Паде – апроксимації передаточної функції (4) такому значенню відносної похибки розбіжності буде відповідати поліном Гурвіца восьмого порядку [10], що суттєво ускладнює структуру передаточної функції пожежі.

Внаслідок цього при виборі математичного опису пожежі класу В при її гасінні розпиленою водою доцільно в якості першого наближення обирати такий опис у вигляді передаточної функції, яка представляє дрібно-раціональну функцію із

поліномом Гурвіца другого порядку, тобто при $m = 1, n = 2$.

Висновки

1. Здійснений перехід від ірраціональної форми представлення передаточної функції пожежі горючої рідини при її гасінні розпиленою водою до дрібно-раціональної форми її представлення. Такий перехід здійснено із використанням мінімаксної апроксимації на основі реалізації алгоритму Ремеза.

2. За допомогою метода невизначених коефіцієнтів побудовані передаточні функції пожежі при їх гасінні розпиленою водою, які представляють суперпозицію декількох передаточних функцій аперіодичних ланок, для яких наведені значення їх параметрів.

3. Показано, що похибка апроксимації за допомогою мінімаксного методу не перевищує 4,0% для порядків поліномів Гурвіца, величини яких не перевищують чотирьох.

Література

1. Fuchs P. (1984) On the extinguishing effect of of various extinguishing agents and extinguishing methods with different fuels. *Five safety*, v. 7, № 2, pp. 165-175. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(84\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(84)90037-7)
2. Smith D.P. (1995) Water mist fire suppression systems. *Fire Safeti Eng*, 79.
3. Тарахно О.В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній службі / О.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов. – Х.: АЦЗУ, 2004 – 252 с.
4. Шевчук В.Г. Фізичні основи пожежовибухонебезпеки: навч. посіб. для вузів / В.Г. Шевчук, Д.Д. Поліщук. - Одеса: Астропринт, 2010. – 244 с.
5. Абрамов Ю.А. Математические модели объекта управления системы водяного автоматического пожаротушения / Ю.А. Абрамов, В.П. Садковой // *Коммунальное хозяйство городов*. – К.: Техніка, 2007. - Вип. 74. С. 413-419.
6. Садковой В.П. Упрощенная математическая модель объекта управления систем автоматического пожаротушения / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // *Научный вестник строительства*. – Х.: ХДТУБА, 2007. – вип. 43. – С. 142-146.
7. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики. Харьков: МОУ МВД Украины, 1993 – 288 с.
8. Садковой В.П. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса Б распыленной водой / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов. – Х.: НУГЗУ, 2010. – 267с.
9. Артюшин Л.М. Теоретичні основи технічної кібернетики / Л.М. Артюшин, Б.В. Дурняк, О.А. Машков, Д.М. Плаценко – Львів: УАД, 2004. – 130с.
10. Абрамов Ю. Модели и характеристики процесса тушения пожаров класса В // Ю. Абрамов, А. Басманов. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 186с.

References

1. Fuchs P. (1984) On the extinguishing effect of of various extinguishing agents and extinguishing methods with different fuels. *Five safety*, v. 7, № 2, pp. 165-175. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(84\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(84)90037-7)

2. Smith D.P. (1995) Water mist fire suppression systems. *Fire Safeti Eng*, 79.
3. Tarakhno O., Sharshanov A. (2004) Fizyko-khimichni osnovy vykorystannia vody v pozhezhnii sluzhbi. Kh.: ATsZU, 252.
4. Shevchuk V., Polishchuk D. (2010) Fizychni osnovy pozhezhovybukhonebezpeky. Odesa: Astroprint, 244.
5. Abramov Yu., Sadkovoï V. (2007) Matematycheskye modely ob'ekta upravleniia systemy vodianoho avtomatycheskoho pozharotusheniia. *Municipal economy of cities*, 74, 413-419.
6. Sadkovoï V., Abramov Yu. (2007) Uproshchennaia matematycheskaia model ob'ekta upravleniia system avtomatycheskoho pozharotusheniia. *Naukovyi visnyk budivnytstva. Kh.: KhDTUBA*, 43, 142-146.
7. Abramov Yu.A. Osnovy pozharnoi avtomatyky. Kharkov: MOU MVD Ukraïny, 1993 – 288 s.
8. Sadkovoï V.P., Abramov Yu.A. (2010) Teoretycheskye osnovy avtomatycheskoho tusheniia pozharov klassa B raspylennoi vodoi. Kh.: NUHZU, 267.
9. Artiushyn L.M., Durniak B.V., Mashkov O.A., Plashchenko D.M. (2004) Teoretychni osnovy tekhnichnoi kibernetiky. Lviv: UAD, 130.
10. Abramov Yu., Basmanov A. (2017) Modely u kharakterystyky protsessu tusheniia pozharov klassa B. *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 186.

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: АБРАМОВ Юрій Олексійович
доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Національний університет цивільного захисту України
E-mail - abramov121146@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

Автор: КОЛОМІЄЦЬ Валерій Станіславович
викладач кафедри організації та технічного забезпечення аварійно – рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України
E mail - kolomiets@nuczu.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4058-4026>

Автор: СОБИНА Віталій Олександрович
кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації та технічного забезпечення аварійно – рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України
E mail - sobol_84@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6908-8037>

MODELS OF FIRE EXTINGUISHING WHEN FLAMMABLE LIQUID COMBUSTION

Y. Abramov, V. Kolomiets, V. Sobyna

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

The process of extinguishing a class B fire with sprayed water is described by the differential equation of heat conduction with boundary conditions of the second kind. The solution of this differential equation in a dimensionless form allows to make a transition to the operative form of representation of the mathematical model of the quenching process - to the transfer function. The peculiarity of such a fire transfer function when extinguishing it with sprayed water is its irrationality, which causes difficulties in its use. One of the ways out of this situation is to switch to an equivalent representation of an irrational function of a complex variable in the form of a small-rational function of such a variable. Such a transition is carried out with the help of the minimax approximation using the Remez algorithm. Determination of the maximum order of the characteristic polynomial of the fire transfer function is carried out using the Hurwitz stability criterion. It is shown that for the transfer function of class B fire, the order of the Hurwitz polynomials does not exceed four, the approximation error does not exceed 3.6% using the method of undetermined coefficients, the transfer functions of the fire when they are extinguished with sprayed water are constructed in the form of a superposition of the transfer functions of aperiodic links. Numerical values of the parameters of such transfer functions were obtained. For the case when the intensity of the sprayed water supply is described by the Heaviside function, expressions describing the temperature of the surface of the burning liquid were constructed. It is noted that these expressions correspond to the expressions that describe the dynamic properties of class B fire in the time domain. It is shown that the maximum value of the relative error when using such transfer functions does not exceed 4.0%, if the general transfer function represents the superposition of the transfer functions of two aperiodic links. It is noted that when using the Padé approximation, the transfer function in the form of the transfer functions of eight aperiodic links corresponds to this value of the divergence error.

Keywords: flammable liquid, fire extinguishing, sprayed water, transfer function.