

УДК 614.8

Ю. А. Абрамов, д. т. н., проф.,
Национальный университет гражданской защиты Украины,
Е. А. Тищенко, к. т. н., доц.,
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля НУГЗ Украины

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КЛАССА В РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

Применительно к процессу тушения пожара класса В с помощью распыленной воды получены выражения для частотных характеристик объекта управления системы тушения.

Ключевые слова: пожар класса В, распыленная вода, объект управления, частотные характеристики.

Постановка проблемы. Использование распыленной воды для тушения пожара класса В является перспективным направлением на пути повышения эффективности систем автоматического пожаротушения. Совершенствование таких систем неразрывно связано с совершенствованием методов их проектирования. Одной из проблем при этом является создание адекватного математического описания процессов, протекающих в первую очередь в объекте управления систем пожаротушения.

Анализ последних исследований и публикаций. Математическое описание процессов, имеющих место при тушении пожаров класса В распыленной водой, в подавляющем числе случаев является эмпирическим и, как правило, сводится к получению функциональной зависимости между показателем, отражающим эффект от использования системы пожаротушения, и показателем, который характеризует управляющее воздействие на очаг горения [1, 2]. В качестве таких показателей обычно используются время тушения и интенсивность подачи распыленной воды. Автоматизация процесса тушения пожаров, в частности, с использованием распыленной воды, обуславливает распространение методов анализа и синтеза систем автоматического управления на системы автоматического пожаротушения. Удачным примером такого подхода следует отметить синтез системы автоматического газового пожаротушения, оптимальной по быстродействию [3]. Дальнейшее развитие такого подхода получило в монографии [4] применительно к системам автоматического пожаротушения с использованием распыленной воды. Однако в этих работах решение задач синтеза систем автоматического пожаротушения не предполагает использование частотных методов, что обусловлено, в первую очередь, отсутствием частотных характеристик объекта управления таких систем.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является построение математических моделей процесса тушения пожара класса В распыленной водой как процесса функционирования объекта управления системы автоматического тушения пожара в частотной области.

Процесс тушения пожара класса В распыленной водой как процесс функционирования объекта управления системы автоматического пожаротушения в переменных вход-выход может быть формализован с помощью передаточной функции вида [5]:

$$W_1(p) = \frac{arK}{\lambda v(T_k - T_0)} [0,5 + (0,25 + p)^{0,5}]^{-1} = \frac{arK}{\lambda v(T_k - T_0)} W(p), \quad (1)$$

где T_k , T_0 – температура кипения горючей жидкости и температура окружающей среды соответственно; a , v , λ – коэффициент температуропроводности, линейная скорость горения и теплопроводность горючей жидкости соответственно; r – теплота испарения воды; K – коэффициент использования воды; $W(p)$ – приведенная передаточная функция объекта управления.

Выражение для амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) объекта управления системы автоматического пожаротушения формально имеет вид:

$$W(j\omega) = W(p)|_{p=j\omega} = [0,5 + (0,25 + j\omega)^{0,5}]^{-1}, \quad (2)$$

однако его использование для решения инженерных задач не представляется возможным.

Преобразуем выражение (2). С этой целью введем в рассмотрение равенство

$$(0,25 + j\omega)^{0,5} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega), \quad (3)$$

где $\alpha(\omega)$, $\beta(\omega)$ – вещественная и мнимая части комплексной функции, подлежащие определению.

Тогда выражение (2) с учетом соотношения (3) принимает вид:

$$W(j\omega) = [0,5 + \alpha(\omega) + j\beta(\omega)]^{-1}, \quad (4)$$

где $\omega = v^{-2}a\Omega$; Ω – размерная круговая частота.

Умножив числитель и знаменатель выражения (4) на комплексно-сопряженное число $0,5 + \alpha(\omega) - j\beta(\omega)$, получим выражение для АФХ объекта управления системы автоматического пожаротушения:

$$W(j\omega) = \frac{[0,5 + \alpha(\omega)]^2 + \beta^2(\omega)}{[0,5 + \alpha(\omega) + j\beta(\omega)][0,5 + \alpha(\omega) - j\beta(\omega)]} = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (5)$$

где $P(\omega) = \frac{[0,5 + \alpha(\omega)]^2 + \beta^2(\omega)}{[0,5 + \alpha(\omega) + j\beta(\omega)][0,5 + \alpha(\omega) - j\beta(\omega)]}$ – вещественная частотная характеристика (ВЧХ) объекта управления;

$Q(\omega) = \frac{[0,5 + \alpha(\omega)]^2 + \beta^2(\omega)}{[0,5 + \alpha(\omega) + j\beta(\omega)][0,5 + \alpha(\omega) - j\beta(\omega)]} \beta(\omega)$ – мнимая частотная характеристика (МЧХ) объекта управления.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) объекта управления определяется выражением [6]:

$$A(\omega) = [P^2(\omega) + Q^2(\omega)]^{0,5}, \quad (6)$$

а фазо-частотная характеристика (ФЧХ) – выражением:

$$\varphi(\omega) = \arctan \left[\frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \right]. \quad (7)$$

Для окончательного определения частотных характеристик объекта управления системы автоматического пожаротушения необходимо получить выражения для $\alpha(\omega)$ и $\beta(\omega)$ и учесть их в выражениях для АФХ, ВЧХ, МЧХ, АЧХ и ФЧХ. С этой целью возведем в квадрат левую и правую части равенства (3), в результате чего получим систему уравнений относительно искомых функций $\alpha(\omega)$ и $\beta(\omega)$:

$$\begin{aligned}\alpha^2(\omega) - \beta^2(\omega) &= 0,25, \\ 2\alpha(\omega)\beta(\omega) &= \omega.\end{aligned}\quad (8)$$

Из первого уравнения системы (8) следует, что

$$\alpha = [0,25 + \beta^2(\omega)]^{0,5}.\quad (9)$$

Тогда после подстановки (9) во второе уравнение системы (8) и возведения в квадрат левой и правой частей получим биквадратное алгебраическое уравнение:

$$4\beta^4(\omega) + \beta^2(\omega) - \omega^2 = 0.\quad (10)$$

Одним из решений этого биквадратного уравнения является:

$$\beta(\omega) = 0,5 \left[0,5 \left[(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{0,5}.\quad (11)$$

Из (9) с учетом (11) следует:

$$\alpha(\omega) = 0,5 \left[0,5 \left[(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 1 \right] \right]^{0,5}.\quad (12)$$

Подставляя (11) и (12) в (5)÷(7), получаем окончательные выражения для частотных характеристик объекта управления:

$$\begin{aligned}W(j\omega) &= \left[1 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} + (1 + 16\omega^2)^{0,5} \right]^{-1} \times \\ &\times \left[2 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} - j \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 2 \right]^{0,5} \right];\end{aligned}\quad (13)$$

$$\begin{aligned}P(\omega) &= \left[1 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} + (1 + 16\omega^2)^{0,5} \right]^{-1} \times \\ &\times \left[2 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} \right];\end{aligned}\quad (14)$$

$$Q(\omega) = - \left[1 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} + (1 + 16\omega^2)^{0,5} \right]^{-1} \times \\ \times \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 2 \right]; \quad (15)$$

$$A(\omega) = 2 \left[1 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} + (1 + 16\omega^2)^{0,5} \right]^{-1}; \quad (16)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left[\left[2(1 + 16\omega^2) - 2 \right]^{0,5} \left[2 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} \right]^{-1} \right]. \quad (17)$$

На рис. 1 приведен график АФХ объекта управления, построенный в соответствии с (13) на комплексной плоскости, а на рис. 2 – фрагмент этой характеристики в области больших значений круговой частоты ω .

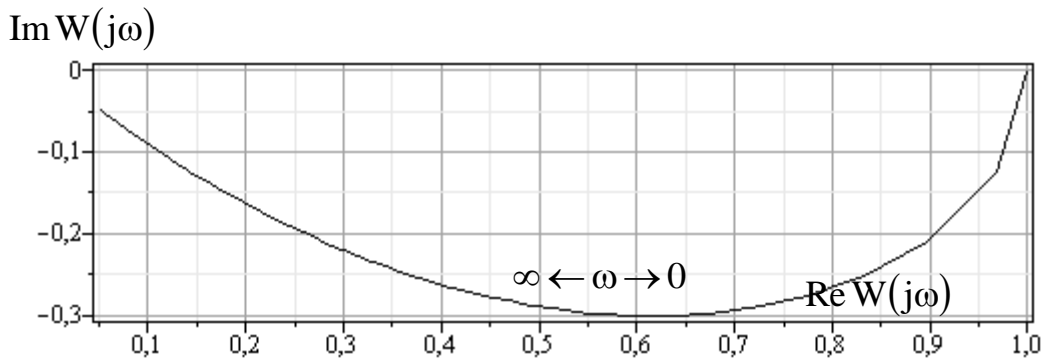


Рисунок 1 – АФХ объекта управления.

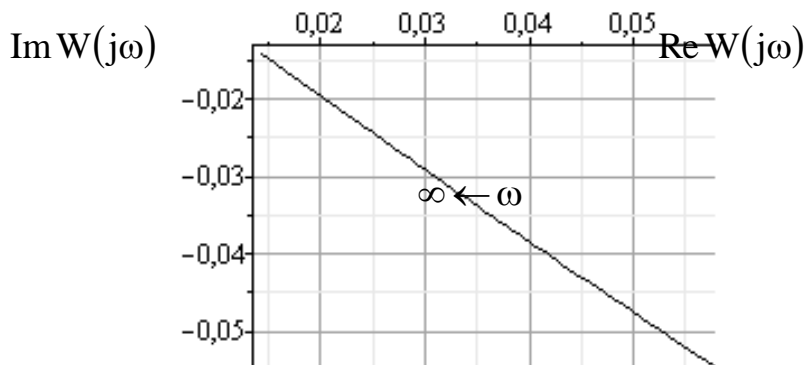


Рисунок 2 – Фрагмент АФХ объекта управления.

На рис. 3 приведены графики $P(\omega)$ и $Q(\omega)$, а на рис. 4 и рис. 5 – графики АЧХ и ФЧХ объекта управления системы автоматического пожаротушения с использованием распыленной воды.

Следует отметить, что

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varphi(\omega) \cong -0,75, \quad (18)$$

т.е. угол сдвига фаз между температурой поверхности горячей жидкости и интенсивностью подачи распыленной воды не превышает 41° .

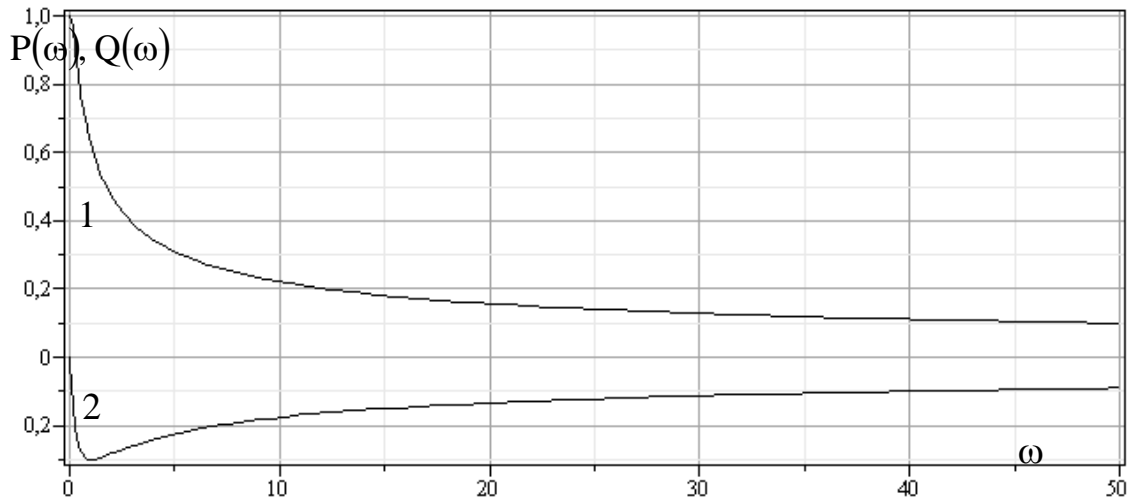


Рисунок 3 – ВЧХ и МЧХ объекта управления: 1 – $P(\omega)$; 2 – $Q(\omega)$.

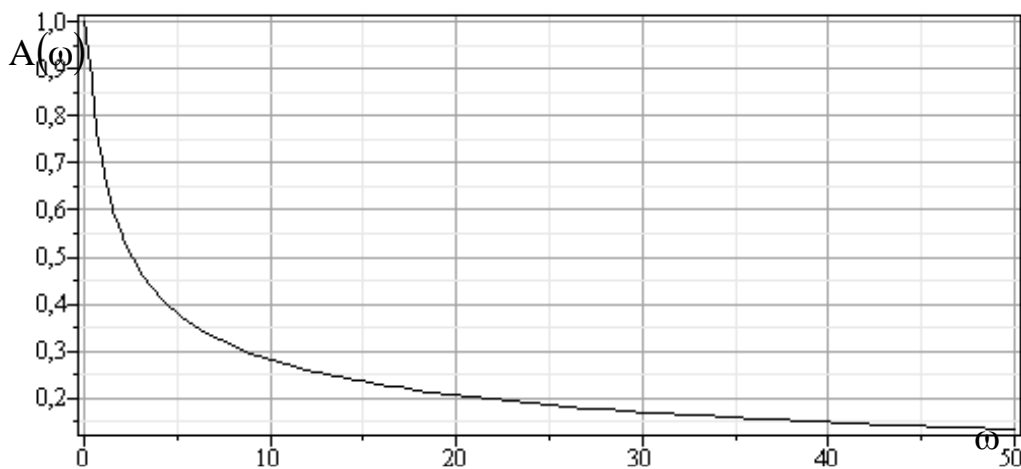


Рисунок 4 – АЧХ объекта управления.

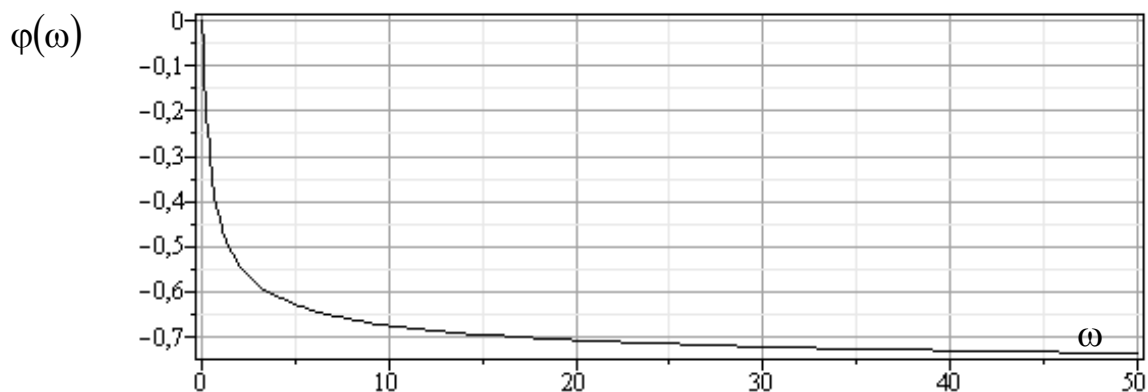


Рисунок 5 – ФЧХ объекта управления.

Необходимо также отметить, что частотные характеристики, описываемые выражениями (13)–(18), являются универсальными, т.е. справедливы применительно к любой горючей жидкости. Адаптация частотных характеристик к конкретной горючей жидкости производится путем учета коэффициента передачи:

$$\arK[\lambda v(T_k - T_0)]^{-1} \quad (19)$$

и перехода к размерной круговой частоте Ω .

Выводы. Применительно к процессу тушения пожара класса В с помощью распыленной воды получены выражения для частотных характеристик объекта управления системы автоматического пожаротушения, которые представлены в безразмерной форме, что обеспечивает удобство их использования для любых горючих жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухно А.Н. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи воды / А.Н. Кухно, Е.Н. Панин // Пожаротушение. – М.: ВНИИПО, 1984. – С. 84-93.
2. Абдурагимов И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 253 с.
3. Губарев А.П. Управление в технических системах с газовым или жидким компонентом / А.П. Губарев, А.В. Узунов, Ю.А. Абрамов и др. – К.: ИСМО, 1997. – 288 с.
4. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Х.: НУГЗУ, 2011. – 927 с.
5. Абрамов Ю.А. Математические модели пожара класса В при его тушении распыленной водой / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – Гомель: ГИИ МЧС республики Беларусь, 2013. – Т.8. – №1. – С. 15-19.
6. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХАПТУ, 1993. – 288 с.