

*В.А. Собина, к.т.н., доцент, нач. каф., НУГЗУ,  
А.А. Хижняк, преподаватель, НУГЗУ,  
Ю.А. Абрамов, д.т.н., профессор, главн.н.с., НУГЗУ*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ ПОЖАРНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальным путем определены параметры передаточной функции, описывающей работу оператора мобильной пожарной установки.

**Ключевые слова:** оператор, мобильная пожарная установка, математическая модель.

**Постановка проблемы.** Одним из направлений, связанным с повышением эффективности тушения пожаров различных классов, является использование мобильных пожарных установок [1]. Такие установки могут выполняться в автоматическом или в автоматизированном вариантах. Во втором случае в контур управления мобильной пожарной установки включается оператор. Одной из проблем при этом является согласование характеристик оператора с характеристиками установки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В последнее время повысился интерес к использованию сегвеев в деятельности аварийно-спасательных служб [2]. В этой связи появилась необходимость в математическом описании оператора таких мобильных средств и, в частности, мобильных средств, целью которых является тушение пожаров. В работе [3] сделаны попытки в описании операторов, обеспечивающих предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций. Однако авторы работы рассматривают деятельность оператора без привязки к конкретной системе, которая будет накладывать весьма существенные ограничения на существующую модель. Следует подчеркнуть, что применительно к мобильным пожарным установкам, в контур управления которых включен оператор, например, построенных с использованием сегвеев [4], отсутствует математическое описание операторов.

**Постановка задачи и её решение.** Целью работы является определение параметров модели, которая описывает работу оператора мобильной пожарной установки (МПУ).

В качестве модели, описывающей работу оператора МПУ в режиме управления угловым положением форсунки в вертикальной плоскости, может быть использована передаточная функция вида [5].

$$W(p) = k \exp(-\tau_0 p)(\tau_1 p + 1)^{-1}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  $\tau_0$  – время запаздывания;  $\tau_1$  – постоянная времени.

Если входное воздействие на оператора МПУ описывается функ-

цией Хевисайда, то его реакция на такое воздействие с учетом (1) формализуется выражением вида

$$x(t) = A \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t - \tau_0}{\tau_1} \right) \right], \quad (2)$$

где  $A$  – постоянная величина.

Из этого выражения следует, что для моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , причем  $t_2 > t_1$ , можно записать

$$t_1 = \tau_1 - \tau_0 \ln(1 - x_1); \quad (3)$$

$$t_2 = \tau_1 - \tau_0 \ln(1 - x_2), \quad (4)$$

где  $x_i$  – приведенное значение функции (2) при  $t = t_i, i = 1, 2$ .

Объединяя (3) и (4), получим выражения для временных параметров оператора МПУ

$$\tau_0 = [\ln(1 - x_1) - \ln(1 - x_2)]^{-1} (t_2 - t_1); \quad (5)$$

$$\tau_1 = [\ln(1 - x_1) - \ln(1 - x_2)]^{-1} [t_2 \ln(1 - x_1) - t_1 \ln(1 - x_2)]. \quad (6)$$

Для определения этих параметров был проведен эксперимент. Входное воздействие, воспринимаемое зрительным анализатором оператора МПУ, создавалось с помощью интерактивной доски [6], на которой по команде от ноутбука формировался очаг горения. Процесс появления такого очага горения на интерактивной доске формализовался функцией Хевисайда.

Реакция оператора на такое воздействие определялась по выходному сигналу потенциометра, механически связанного с ручкой управления, которая имеет одну угловую степень свободы [5,6]. Электрический сигнал с выхода потенциометра подавался параллельно на два компаратора [5], выполненных на усилителях постоянного тока К140УД13, в цепь обратной связи которых включены диод и стабилитрон. На один компаратор подавалось опорное напряжение, равное  $0,2 E$ , а на второй  $0,5 E$ , где  $E$  – напряжение, величина которого выбиралась равной  $6,0 В$ .

При появлении на интерактивной доске очага горения оператор осуществлял с максимальной угловой скоростью поворот ручки управления, механически связанной с потенциометром. При этом, на выходе первого компаратора формировался прямоугольный импульс длительностью  $t_1$ , а на выходе второго компаратора – прямоугольный импульс длительностью  $t_2$ . Эти интервалы времени измерялись с помощью частотомеров ЧЗ – 64/1.

Для проведения эксперимента привлекалось  $m = 12$  человек, у которых отсутствовал опыт работы с таким оборудованием. С каждым оператором проводилось  $n = 16$  опытов. По результатам опытов были сформированы две матрицы, каждая размером  $m \times n$ . Столбцами этих матриц являются результаты измерения параметров  $t_1$  или  $t_2$  в  $i$ -м опыте

всеми операторами, а строками матриц служат результаты измерений параметров  $t_1$  или  $t_2$   $j$ -го оператора для всех  $n$ -опытов.

По результатам измерений определялись математические ожидания  $t_{1j}$  и  $t_{2j}$  для каждого из  $m$  операторов, т.е.

$$t_{1j} = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{1j}; \quad t_{2j} = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{2j}, \quad (7)$$

а затем – математические ожидания  $t_{10}$  и  $t_{20}$  для всех  $m$  операторов

$$t_{10} = m^{-1} \sum_{j=1}^m t_{1j}; \quad t_{20} = m^{-1} \sum_{j=1}^m t_{2j}, \quad (8)$$

по результатам экспериментов были получены значения

$$t_{10} = 0,31c; \quad t_{20} = 0,41c. \quad (9)$$

При этом, среднеквадратическое отклонение для величин  $t_1$  и  $t_2$  соответственно равно  $\sigma_{t_1} = 0,028c$  и  $\sigma_{t_2} = 0,027c$ .

Значение параметров (9) в соответствии с выражениями (3) и (6) соответствуют значения параметров оператора МПУ  $\tau_0$  и  $\tau_1$ , равные  $0,21c$  и  $0,28c$  со среднеквадратическими отклонениями  $0,08c$  и  $0,04c$ .

Тогда с доверительной вероятностью  $0,95$  значения параметров  $\tau_0$  и  $\tau_1$  будут находиться соответственно в пределах  $0,17c < \tau_0 < 0,25c$ ;  $0,26c < \tau_1 < 0,30c$ .

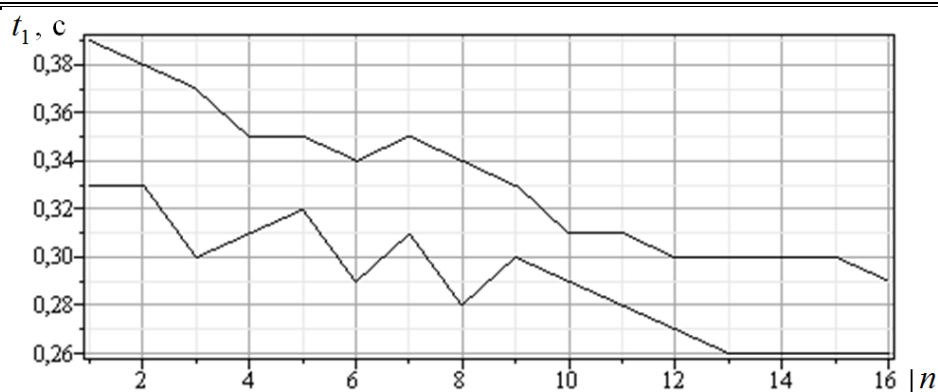
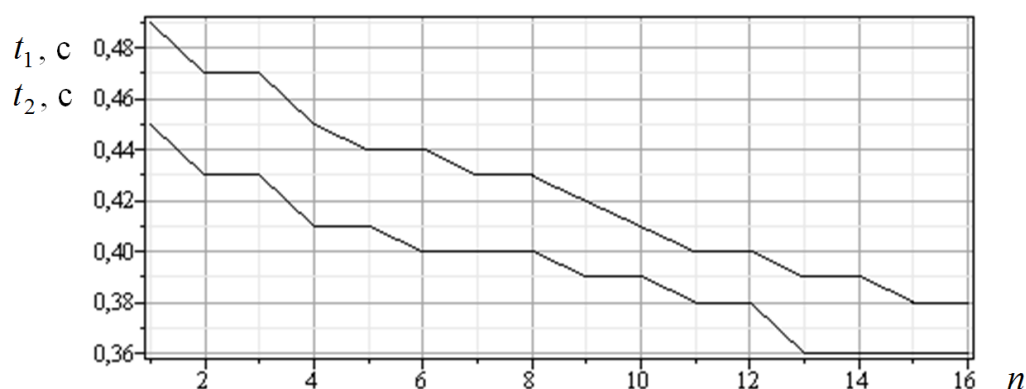
Для определения параметра  $k$  в (1) использовалось эмпирическое соотношение [7]

$$k = 9\tau_1, \quad (10)$$

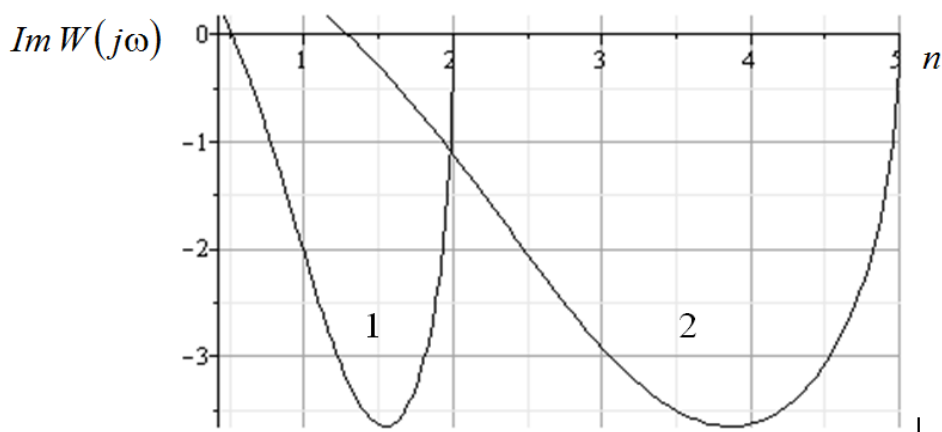
что приводит к тому, что  $k = 2,5$ .

С использованием результатов измерений были построены области существования значений параметров  $t_1$  и  $t_2$ , которые приведены соответственно на рис. 1 и рис. 2.

Верхним кривым, приведенным на рис. 1 и рис 2, соответствуют наибольшие значения параметра, а нижним – наименьшие значения. Из анализа этих зависимостей следует, что с ростом числа опытов имеет место уменьшение значений этих параметров. Такая тенденция обусловлена возрастанием степени тренированности операторов МПУ. Начиная с 12 опыта имеет место стабилизация значений параметров  $t_1$  и  $t_2$ . Средние значения этих параметров асимптотически стремятся соответственно к значениям  $0,28c$  и  $0,37c$ . Этим значениям в соответствии с выражениями (5) и (6) будут соответствовать минимальные значения параметров оператора МПУ, равные  $\tau_{0\min} = 0,19c$  и  $\tau_{1\min} = 0,23c$ .

Рис. 1. Область существования значений параметра  $t_1$ Рис. 2. Область существования значений параметра  $t_2$ 

На рис. 3 приведены графические зависимости для амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) оператора МПУ, построенные при  $\tau_0 = 0,2c$  и  $\tau_1 = 0,3c$  для  $k = 2,0$  и  $k = 5,0$  соответственно. Зависимости приведены для  $\omega \leq 10c^{-1}$ .

Рис. 3. Амплитудно-фазовые частотные характеристики оператора МПУ: 1 – при  $k = 2,0$ ; 2 – при  $k = 5,0$ 

На рис. 4 приведены графические зависимости для амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) оператора МПУ при таких же значениях параметров передаточной функции (1).

График для фазово-частотной характеристики (ФЧХ) оператора МПУ приведен на рис. 5.

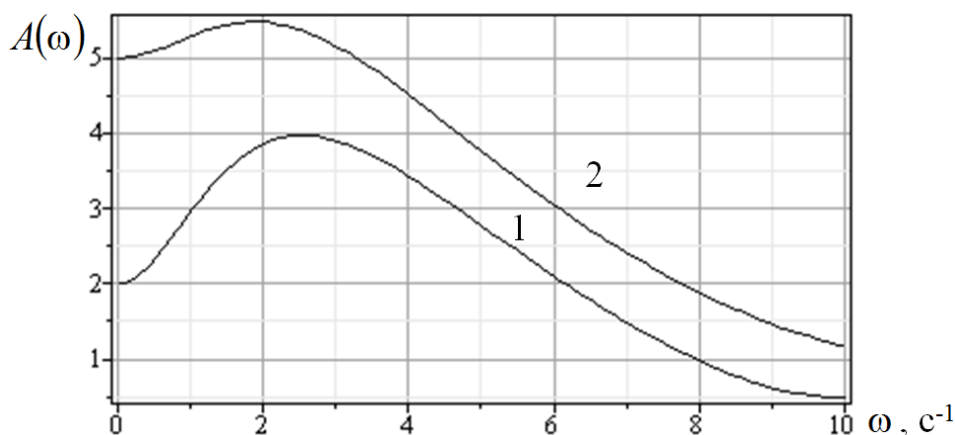


Рис. 4. АЧХ оператора МПУ: 1 –  $k = 2,0$ ; 2 –  $k = 5,0$

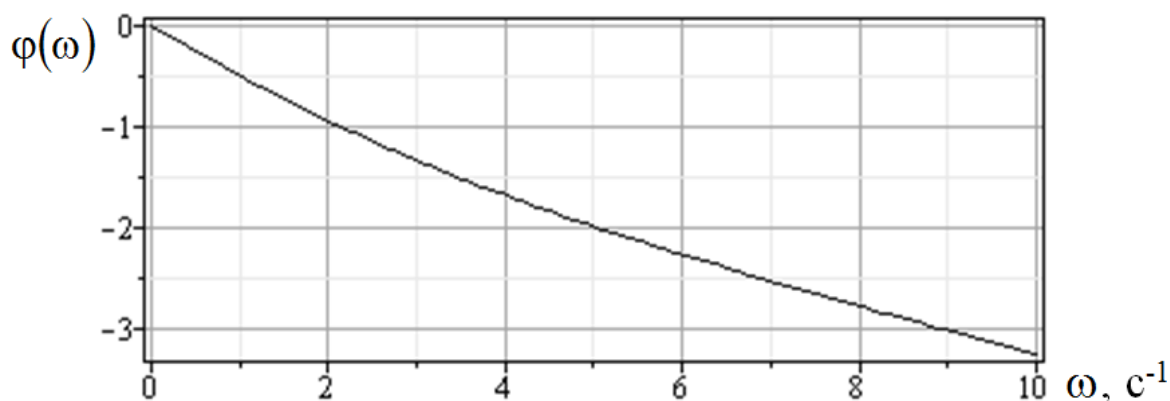


Рис. 5. ФЧХ оператора МПУ

Особенностью частотных характеристик оператора МПУ является более интенсивное возрастание амплитуды выходного сигнала оператора – угла поворота ручки управления с уменьшением коэффициента передачи. Такой эффект имеет место на частотах порядка  $(2,2 \div 2,3) \text{ c}^{-1}$  при  $k = 2,0$ . С увеличением значения  $k$  проявление этого эффекта ослабляется при одновременном незначительном смещении максимума АЧХ влево.

**Выводы.** Применительно к деятельности оператора МПУ экспериментальным путем определены параметры его математической модели, которая принадлежит к классу передаточных функций. Составляющими такой передаточной функции являются запаздывающее и апериодическое динамические звенья. По результатам эксперимента, в котором участвовали двенадцать операторов, определено время запаздывания, равное  $0,21 \text{ c}$ , и постоянная времени, равная  $0,28 \text{ c}$ . Полученные частотные характеристики, представлены в графической форме. Особенностью, в частности, амплитудно-частотных характеристик оператора МПУ является наличие экстремумов в области частот  $(1,7 \div 2,4) \text{ c}^{-1}$  при значениях коэффициента передачи, лежащих в диапазоне  $(2,0 \div 5,0)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбань Ю.И. Пожарные работы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране / Ю.И. Горбань. – М.: Пожнаука, 2013. – 352 с.
2. <https://h:-news.ru/roboty-pozharnyena-strazhe-vashey-bezopasnosti/html>
3. Кремень М.А. Специалисты по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций как звенья следящей системы / М.А. Кремень, А.П. Герасимчик, О.В. Богомаз // Вестник командно-инженерного института МЧС РБ. – №1(17). – 2013. – С.81 -88.
4. Пат. № 119180 Україна, МПК А62С 37/00. Мобільна пожежна установка / Абрамов Ю.О., Тищенко Є.О., Собина В.О., власник НУЦЗУ. – 201706071, заявл. 24.04.2017; опубл 11.09.2017, Бюл. № 17.
5. Пат. № 128951 Україна, МПК А62С 37/00. Пристрій для визначення характеристик оператора мобільного пожежного робота / Абрамов Ю.О., Собина В.О., Тищенко Є.О., Хижняк А.А., власник НУЦЗУ. – 2018050111, заявл. 8.05.2018; опубл 10.10.2018, Бюл. № 19.
6. Пат. № 130568 Україна, МПК А62С 37/00. Пристрій для визначення характеристик оператора мобільного пожежного робота / Абрамов Ю.О., Собина В.О., Тищенко Є.О., Хижняк А.А., власник НУЦЗУ. – 201807407, заявл. 2.07.2018; опубл 10.12.2018, Бюл. № 23.
7. Paupkoff K. The optimization of connection between Human and techniques in Man-Machine Systems // Preprints of JFAC-JFORS Symposium (Varna, Bulgaria? 8-11 oct. 1974)/ – P. 419-426.

*Получено редколлегией 12.03.2019*

В.О. Собина, А.А. Хижняк, Ю.О. Абрамов

### **Визначення параметрів моделі оператора мобільної пожежної установки**

Експериментальним шляхом визначені параметри передаточної функції, яка описує роботу оператора мобільної пожежної установки.

**Ключові слова:** оператор, мобільна пожежна установка, математична модель.

V. Sobina, A. Hizhnyak, Yu. Abramov

### **Determination of parameters of the model of the operator of a mobile fire installation**

Experimentally determined parameters of the transfer function, which describes the operation of the operator of a mobile fire installation.

**Keywords:** operator, mobile fire installation, mathematical model.