

УДК 004.89

А.Н. ЗЕМЛЯНСКИЙ, В.В. ЛИТВИНОВ, В.Е. СНИТЮК

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ И ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ ПРИНЦИП
ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ПОЖАРНОГО МОНИТОРИНГА**

Анотація. У статті розглянуто проблему проектування і оптимізації систем пожежного моніторингу. Запропоновано причинно-наслідковий принцип оптимізації таких систем, у відповідності з яким їх надійність та ефективність повинні залежати від кількості можливих жертв і масштабу можливих збитків. Розроблено елементи технології прийняття рішень при проектуванні систем пожежного моніторингу з використанням такого принципу, а також результатів моделювання, одержаних на основі застосування композиції методів «м'яких» обчислень.

Ключові слова: пожежі, системи пожежного моніторингу, невизначеність, нечіткі продукційні правила, еволюційне моделювання.

Аннотация. В статье рассмотрена проблема проектирования и оптимизации систем пожарного мониторинга. Предложен причинно-следственный принцип оптимизации таких систем, в соответствии с которым их надежность и эффективность должны зависеть от количества возможных жертв и масштаба материального ущерба. Разработаны элементы технологии принятия решений при проектировании систем пожарного мониторинга с использованием такого принципа, а также результатов моделирования, полученных на основе применения композиции методов «мягких» вычислений.

Ключевые слова: пожары, система пожарного мониторинга, неопределенность, нечеткие продукционные правила, эволюционное моделирование.

Abstract. In this paper, the problem of designing and optimization of fire monitoring systems is considered. The cause-effect principle of optimization of such systems, according to which their reliability and efficiency should depend on quantity of possible victims and scale of property loss, is offered. The decision making technology elements for the design of fire monitoring systems, with the use of such principle, and also modeling results obtained on the basis of composition of Soft Computing methods, are developed.

Key words: fires, system of fire monitoring, uncertainty, fuzzy production rules, evolutionary modeling.

1. Введение

Системы пожарного мониторинга, как известно, предназначены для сигнализации о пожаре, а также для включения системы автоматического пожаротушения на некоторых объектах. В Украине системами автоматической пожарной защиты оборудовано около 350 тысяч объектов, что составляет приблизительно 90% от их необходимого количества. В год в эксплуатацию вводится 15–18 тысяч систем пожарной автоматики. Вместе с тем, существуют регионы, в которых такими системами оборудовано только 11–30% объектов. Кроме того, в эксплуатацию вводится незначительное количество новых высокотехнологичных систем (до 200 установок в год). Примерно 11–12% установленных систем от общего числа являются нерабочими, только 70–75% установок проходят техническое обслуживание. Среди объектов, на которых происходили пожары, в 15–20% случаев сигнализация не сработала.

Анализ приведенной информации указывает на низкую эффективность существующих систем пожарного мониторинга, недостатки их проектирования, халатное отношение к обслуживанию. Вместе с тем, убытки от пожаров многократно превышают потенциальные расходы на проектирование и внедрение таких систем.

2. Формализованная постановка задачи

Традиционно установка систем пожарного мониторинга (СПМ) осуществляется в соответствии с определенными нормами и стандартами. Ограничимся рассмотрением главной подсистемы СПМ – датчики пожарной сигнализации. Их размещение определяется такими требованиями. Если потолок является плоским, то между любой точкой помещения (ее горизонтальной проекцией) и ближайшими датчиками расстояние не должно превышать 7,5 м для дымового и 5,3 м – для теплового датчиков (рис. 1, 2). Известно также, что традиционно применяются прямоугольная (рис. 1,2) и треугольная (рис. 3) схемы размещения датчиков. Треугольная схема является более экономичной и применяется в помещениях большой площади.

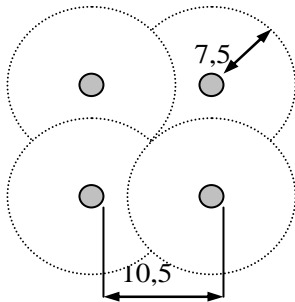


Рис. 1. Размещение дымовых датчиков

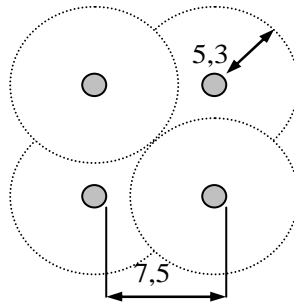


Рис. 2. Размещение тепловых датчиков

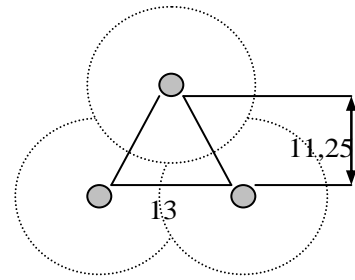


Рис. 3. Треугольная схема размещения датчиков

Рассмотрим задачу оптимизации количества и структуры датчиков пожарной сигнализации безотносительно к их типу.



Рис. 4. Распространение теплого воздуха и дыма

Известно, что тепло и дым при пожаре, возникшем в нижней части помещения, поднимаются вертикально вверх и распространяются под потолком (рис. 4). Датчики пожаротушения находятся на потолке или возле потолка и, чем длиннее будет путь от места возникновения пожара до горизонтальной проекции датчика, тем больше будет время от возникновения пожара до срабатывания датчика. В помещении могут быть один или

несколько датчиков и они должны быть установлены так, чтобы суммарное расстояние от предполагаемых очагов возгорания до ближайшего датчика было минимальное.

Определение структуры и состава системы пожарного мониторинга является сложной многокритериальной задачей, которая в реальных условиях не решается. Осуществим формализованную постановку данной задачи. Пусть

Z_p – стоимость проектирования СПМ;

Z_1 – стоимость элементной базы СПМ;

Z_u – стоимость установки СПМ;

P – вероятность возникновения пожара на объектах подобного типа;

$D_1 = \{d_1^1, d_1^2, \dots, d_1^{k_1}\}$, $D_2 = \{d_2^1, d_2^2, \dots, d_2^{k_2}\}$ – множества факторов, значения которых увеличивают или уменьшают вероятность возникновения пожара (имеют локальный характер);

$L(t), M(t)$ – количество возможных жертв и величина материального ущерба в зависимости от времени срабатывания сигнализации о пожаре;

$L(t) = \{L_{in}(t), L_{out}(t)\}$, $M(t) = \{M_{in}(t), M_{out}(t)\}$, где $L_{in}(t)$ и $M_{in}(t)$ – количество человеческих жертв и величина материального ущерба непосредственно в помещении, где произошел пожар, $L_{out}(t)$ и $M_{out}(t)$ – человеческие жертвы и материальный ущерб вне помещения, вызванные последствиями пожара;

H, V – высота и объем помещения;

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_{k_r}\}$ – множество, содержащее требования норм и стандартов;

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{k_q}\}$ – множество, элементы которого указывают на наличие и расположение систем кондиционирования и фильтрации;

U – показатель квалификации обслуживающего персонала;

$B = \{b_1, b_2, \dots, b_{k_b}\}$ – множество, элементы которого указывают на наличие и координаты основных источников опасности;

O, T – влажность и температура (в некоторых случаях являются функциями времени);

G – уровень надежности системы;

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_{k_a}\}$ – значения прочих параметров, оказывающих влияние на СПМ.

Необходимо решить задачи

$$E \rightarrow \max, \quad \Omega \rightarrow \min, \quad (1)$$

где E – эффективность СПМ, Ω – затраты на ее проектирование и установку при ограничениях

$$\Theta \in \Psi \quad (\Theta_i = \Theta_i^*, \Theta_j < \Theta_j^*, \Theta_l \in \Theta_l^*), \quad (2)$$

где Ψ – некоторая область, в которой лежат значения параметров СПМ, причем некоторые параметры должны иметь точно заданные значения, значения других параметров не превышают граничных констант, а значения третьих не выходят за пределы указанных областей. Очевидно, что задачи (1) являются противоречивыми.

Критерий эффективности и затраты на установку, проектирование и элементную базу являются многофакторными зависимостями, вследствие чего (1) перепишем таким образом:

$$E = E(L(t), M(t), P, G, D_1, D_2, B, U, O, T, A) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$\Omega = \Omega(Z_p, Z_l, Z_u, H, V, R, Q, U, A) \rightarrow \min, \quad (4)$$

в свою очередь,

$$Z_p = Z_p(P, D_1, D_2, H, V, R, Q, B, U, O, T, G, A). \quad (5)$$

Сделаем некоторые упрощающие предположения:

– влажность и температура в помещении являются постоянными величинами, высота и объем помещения известны, поэтому минимальное количество датчиков N_d^{\min} , определяемое значениями параметров из R и соответствующими схемами (рис. 1–3), известно;

– значения параметров множества Q и показатель U увеличивают или уменьшают надежность СПМ;

– вероятность возникновения пожара P на объектах подобного типа корректируется с учетом наличия и значений элементов множества B .

Таким образом, количество учитываемых факторов сокращается. При этом параметр P рассчитываем как $P = \frac{M_n}{M_o}$, где M_o – общее количество типовых помещений, M_n – количество пожаров, произошедших в них. Если на конкретном объекте есть дополнительные источники пожарной опасности в отличие от типовых объектов, то $P = \frac{(1 + \alpha)M_n}{M_o}$, в предположении, что $M_n \ll M_o$. В случае отсутствия источников, являющихся атрибутами типовых объектов, $P = \frac{(1 - \alpha)M_n}{M_o}$, где α – коэффициент, указывающий на степень опасности дополнительных возможных источников пожара.

Исходя из нормативных величин или экспертных оценок, в зависимости от точки возникновения пожара в помещении, а также от срабатывания пожарной сигнализации и времени срабатывания, разными могут быть значения $L(t)$ и $M(t)$ [1, 2]. Пусть минимальные и максимальные возможные значения количества потенциальных жертв и масштабов

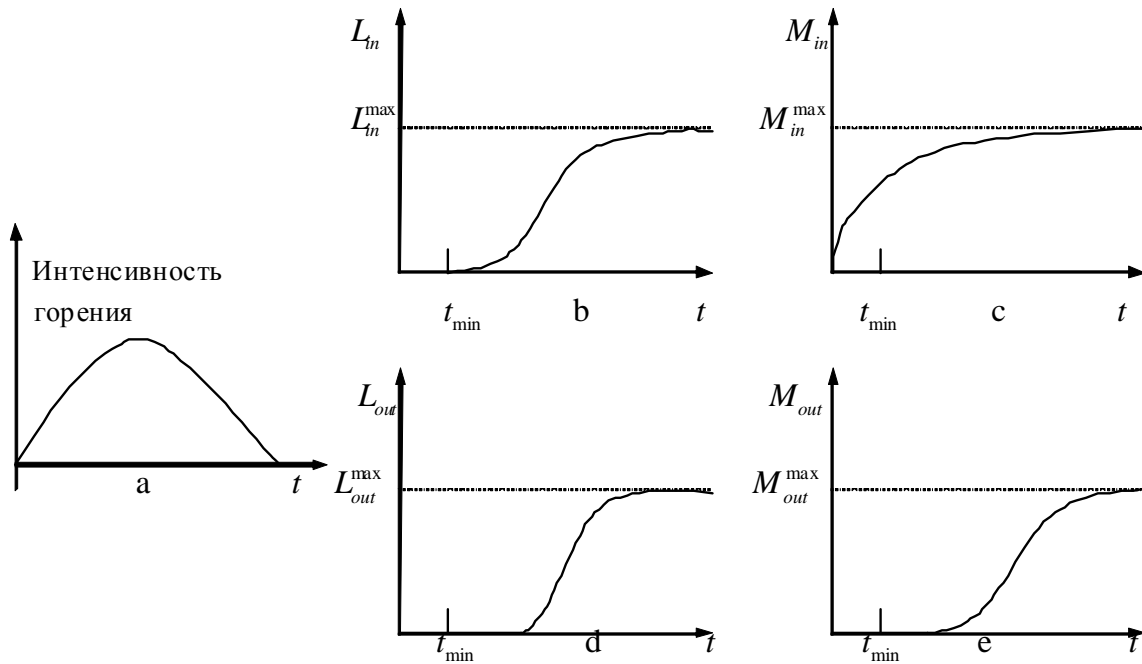


Рис. 5. Динамика процесса горения и последствий пожара

материального ущерба известны и составляют (рис. 5)

$$L_{in}(t) \in [0, L_{in}^{\max}], L_{out}(t) \in [0, L_{out}^{\max}], M_{in}(t) \in [M_{in}^{\min}, M_{in}^{\max}], M_{out}(t) \in [0, M_{out}^{\max}]. \quad (6)$$

Зависимости $L_{in}(t), L_{out}(t), M_{in}(t), M_{out}(t)$ могут быть идентифицированы следующим образом. Учитывая особенности пожарной нагруженности помещения и то, что датчики «покрывают» возможное место возгорания неравномерно, используем экспертные заключения в виде нечетких продукционных правил [4–7]:

$$\text{Если } x_0 \in C_1 \text{ \& } y_0 \in C_2 \text{ \& } z_0 \in C_3 \text{ \& } t_0 \in C_4 \text{ \& } G \in C_5, \text{ то } L_{in}(t) \in C_6, \quad (7)$$

где (x_0, y_0, z_0) – координаты предполагаемой точки возгорания, t_0 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до срабатывания датчика, G – надежность СПМ,

C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – нечеткие множества с соответствующими функциями принадлежности, указывающими на уверенность эксперта в определении координат точки возникновения пожара, время и надежность СПМ. В соответствии с теоремой ФАТ [3] аддитивной нечеткой системой (7) осуществляется аппроксимация непрерывной функции. Предположим, что все функции принадлежности в (7) являются гауссовскими: $\mu_c(x) = \exp(-\frac{1}{2}(\frac{x-a}{\sigma})^2)$,

где a и σ – параметры. В качестве модели, отображающей правило (7), выберем нечеткую нейронную сеть (ННС) с нечетким выводом Мамдани [6]. Используя заключения экспертов о возможных точках возникновения пожара, времени срабатывания датчиков и надежности СПМ, производим обучение ННС. В дальнейшем обученная ННС может использоваться для моделирования критических ситуаций или в режиме реального времени – для оценки последствий пожара и принятия решений.

Таким образом, получены модели, позволяющие оценить

$$LM_i(t) = Y(x_0, y_0, z_0, t_0, G), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (8)$$

где

$$LM_1(t) = L_{in}(t), \quad LM_2(t) = L_{out}(t), \quad LM_3(t) = M_{in}(t), \quad LM_4(t) = M_{out}(t). \quad (9)$$

В выражениях (3), (5), (7), (8) присутствует параметр G и, несмотря на то, что его значение определяется экспертом, формализуем подход к определению надежности G . Будем считать, что надежность системы СПМ определяется правильным и своевременным обнаружением пожара.

Предположим, что все датчики имеют одинаковую вероятность правильного срабатывания p_d . Эффективность функционирования системы СПМ определяется расстоянием от i -го источника опасности или точки возникновения пожара до горизонтальной проекции датчика или датчиков. Соответствующей составляющей критерия эффективности выбирают:

- минимальное время срабатывания датчика от момента возникновения пожара;
- среднее ожидаемое время срабатывания датчика при пожаре в помещении;
- максимальное время срабатывания датчика.

Возможны следующие ситуации:

1. Пожарная нагруженность помещения является равномерной постоянно во времени.
2. Некоторое время t_p пожарная нагруженность помещения является постоянной, но в течение времени t_n она может изменяться (известно соотношение t_p/t_n).
3. Пожарная нагруженность помещения неравномерна, что соответствует неравномерному распределению источников опасности (малому, среднему или большому их количеству).
4. Потенциальные источники опасности отсутствуют.

Пусть имеет место первый случай. Тогда по нормативам датчики устанавливаются в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Предположим, что помещение имеет размеры 55x25 м. Тогда необходимо установить 10 датчиков, по два в ряд. Примерно для 18% площади будет иметь место двойное резервирование (зона ответственности одновременно двух датчиков), и 82% площади относятся к зоне ответственности одного датчика. Таким образом, в 82% случаев возникновения пожара вероятность срабатывания датчика будет p_d , а в 18% – $1 - (1 - p_d)^2$. Если считать, что $p_d = 0,9$, то $1 - (1 - p_d)^2 = 0,99$. Данные свидетельствуют о том, что в первом случае датчик не сработает, вероятно, в одном

случае из 10, а во втором – один раз из 100. Такой результат указывает на то, что двойное резервирование повышает эффективность системы на порядок.

Кроме вероятности срабатывания датчика, важным параметром является расстояние от места возникновения пожара до горизонтальной проекции ближайшего датчика. Для 18% площади такое расстояние $d \in (2,5 м; 7,5 м)$, для остальных 82% – $d \in (0 м; 7,1 м)$. Среднее значение расстояния в первом случае $\bar{d} \approx 5,5 м$, во втором – $\bar{d} \approx 5 м$. Таким образом, делаем вывод о том, что в случае высоконадежных датчиков их необходимо размещать над источником опасности, если это не так, то осуществлять резервирование. Очевидно, что если вероятность возникновения пожара в помещениях аналогичного типа является значительно меньше 0,01, исключены человеческие жертвы и возможен небольшой материальный ущерб при дефиците средств на проектирование и установку системы с резервированием (> 18%), рационально ограничиться нормативными требованиями. Если хотя бы одно из приведенных условий не выполнено, то необходимо осуществлять дополнительное резервирование, исходя из прогнозируемого количества жертв и масштаба материального ущерба. Учитывая ограниченность финансовых средств, необходимо решить задачу максимизации критерия эффективности системы, сводящуюся к оптимальному размещению фиксированного количества датчиков.

Пусть пожарная нагруженность помещения является равномерной, но существуют и источники повышенной опасности, вероятность возникновения пожара в которых является достаточно большой или достижение огнем которых может привести к техногенным или экологическим катастрофам (рис. 5). Предположим, что, согласно нормативам, необходима установка N датчиков по прямоугольной схеме. Стоимость соответствующей элементной базы, проектирования и установки составляет S_{\min} . Если в результате пожара в помещении или вне его могут погибнуть люди, то на создание СПМ необходимо израсходовать максимально возможные финансовые ресурсы S_{\max} . Рационально считать, что $S_{\max} - S_{\min} < \delta$, где δ – стоимость увеличения количества датчиков, как минимум, на единицу (включая стоимость проектирования и установки). В таком случае задача оптимизации СПМ сводится к оптимизации структуры датчиков при фиксированном их количестве. Пусть все точки помещения принадлежат зоне ответственности хотя бы одного датчика, представляющей собой круг. Таким образом, горизонтальные проекции зон ответственности пересекаются, образуя области Ξ_i с разной кратностью ответственности датчиков, $i = \overline{1, k_{\Xi}}$, где k_{Ξ} – количество таких областей. Зная координаты размещения каждого датчика (x_d^j, y_d^j) , $j = \overline{1, N}$ и радиус зоны ответственности r_d , можно получить соответствующую карту. Тогда задача оптимизации СПМ формально сводится к минимизации функционала:

$$F(W) = F(X, Y) = \sum_{i=1}^{k_{\Xi}} \frac{1}{p_c^i} t_c^i \rightarrow \min, \quad (10)$$

где W – структура системы датчиков, $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$, (x_i, y_i) , $i = \overline{1, N}$ – координаты датчика, p_c^i – вероятность срабатывания датчика или датчиков с учетом резервирования, t_c^i – среднее время от начала пожара, возникшего в точке области Ξ_i , до момента времени срабатывания датчика. Решением задачи (10) будут координаты размещения датчиков в случае отсутствия источников опасности в помещении.

Рассмотрим модифицированную задачу, соответствующую случаю наличия источников опасности. Предположим, что каждый из N_{io} источников опасности характеризует-

ся вероятностью возникновения на нем пожара $p_{io}^j, j = \overline{1, N_{io}}$, определяемой экспертным путем [2]. Задачу (10) перепишем таким образом:

$$F(W) = F(X, Y) = \sum_{j=1}^{N_{io}} \sum_{i=1}^{k_{\Xi}} p_{io}^j \frac{1}{p_c} t_c^i \chi(p_{io}^j \in \Xi_i) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $\chi(*)$ – функция-индикатор.

Решения задач (10) – (11) определяют структуру размещения датчиков СПМ. Полученные координаты точек размещения датчиков $\{(x_d^j, y_d^j)\}_{j=1}^N$ позволяют определить среднее время, прошедшее от времени возникновения пожара до времени срабатывания датчика, и надежность СПМ. Подставив координаты точки пожара (x_0, y_0, z_0) , надежность G и вычисленное время t_0 в (8), получим предполагаемое количество жертв и масштаб предполагаемого ущерба. При наличии ресурсной и финансовой баз лицо, принимающее решение, может пересмотреть полученную структуру СПМ.

Задачи (10) – (11) являются задачами дискретной оптимизации, решаемыми в условиях неопределенности [8]. Поскольку целевая функция является сложной полиэкстремальной зависимостью, то адаптируем для ее решения эволюционные методы. Одним из таких методов является генетический алгоритм [9, 10]. Шаги метода определения оптимальной структуры с использованием элементов генетического алгоритма будут такими:

Шаг 1. Для рассматриваемого помещения ввести систему координат.

Шаг 2. Определить дискретность размещения датчиков \mathcal{E} и количество элементов генерального множества (множество потенциальных решений) N_N . Структура элемента будет такой: $\Lambda = (x_1, y_2, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N)$.

Шаг 3. Задать значение параметра σ и определить количество элементов K в выборочном множестве.

Шаг 4. $i = 1$. Выполнить генерацию элементов i -го множества $\Lambda_j, j = \overline{1, K}$. При этом проверить выполнение условий:

- зоны ответственности датчиков должны «покрывать» все помещение;
- $\forall l \exists j: d_{lj} < 10,5 \text{ м}$ (для тепловых датчиков), где d_{lj} – расстояние между l -м и j -м датчиками.

Если хотя бы одно из таких условий не выполняется, то генерацию необходимо выполнить еще раз.

Шаг 5. Найти значение функции приспособленности (целевой функции) для каждого набора координат датчиков $(F(C_1), F(C_2), \dots, F(C_K))$ и их среднее значение F_{cp}^i . Заметим, что предварительно необходимо вычислить вероятность срабатывания датчиков и среднее время между временем начала пожара и временем срабатывания датчиков.

Шаг 6. В зависимости от значений $F(C_j), j = \overline{1, K}$ и в соответствии с принципом рулетки выбрать два элемента Λ_i и Λ_j и выполнить кроссовер, получив два новых потенциальных решения.

Шаг 7. Одно решение с определенной вероятностью подвергнуть мутации и поместить в промежуточное множество. Повторить операции кроссовера и мутации K раз.

Шаг 8. Среди элементов i -го и промежуточного множеств выбрать наборы с большими значениями целевой функции и поместить в $(i + 1)$ -е выборочное множество.

Шаг 9. Найти среднее значение F_{cp}^{i+1} . Если $|F_{cp}^{i+1} - F_{cp}^i| < \sigma$, то закончить алгоритм, иначе $i = i + 1$ и перейти на шаг 6.

Результатом выполнения алгоритма будут координаты датчиков, соответствующие оптимальной структуре и решению задач (10) – (11).

3. Заключение

Неопределенность процесса оптимизации структуры СПМ вызвана неполнотой исходной информации, непрогнозируемостью действий обслуживающего персонала, субъективизмом процесса прогнозирования количества жертв и масштабов материального ущерба.

В статье предложено осуществлять проектирование и установку СПМ, исходя из масштабов негативных последствий предполагаемого пожара. С этой целью разработан метод идентификации потенциально возможного количества жертв в зависимости от точки возникновения пожара, времени срабатывания датчиков и надежности СПМ с использованием нечеткой нейронной сети с нечетким выводом Мамдани. Формализован подход к определению надежности системы пожарного мониторинга как зависимости от вероятности правильного срабатывания пожарных датчиков и пожарной нагруженности помещения. Учитывая характер решаемых задач, разработана технология оптимального размещения пожарных датчиков с использованием эволюционных методов, что определяется сложным полиэкстремальным характером целевых функций. Полученные результаты могут быть положены в основу информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при пожаротушении и использованы как непосредственно при проектировании систем пожарного мониторинга и пожаротушении, так и при проведении профилактических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Землянський А.Н. Проектирование систем пожарного мониторинга в условиях неопределенности / А.Н. Землянський, Н.П. Каревина, В.Е. Снитюк // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 483 – 488.
2. Снитюк В.Е. Эволюционные технологии принятия решений при пожаротушении / Снитюк В.Е., Быченко А.А., Джулай А.Н. – Черкассы: Маклаут, 2008. – 268 с.
3. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators / B. Kosko // IEEE Transactions on Computers. – 1994. – Vol. 43, N 11. – P. 1329 – 1333.
4. Zadeh L. A. Fuzzy logic, neural network and soft computing / L.A. Zadeh // Communications of the ACM. – 1994. – Vol. 37, N 3. – P. 77 – 84.
5. Zadeh L. Fuzzy sets / L. Zadeh // Information and control. – 1965. – № 8. – P. 338 – 353.
6. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Зайченко Ю.П. – К.: Слово, 2008. – 344 с.
7. Снитюк В.Є. Прогнозування. Моделі, методи, алгоритми / Снитюк В.Є. – К.: Маклаут, 2008. – 364 с.
8. Волошин О.Ф. Моделі та методи прийняття рішень / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2010. – 336 с.
9. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control and artificial intelligence / Holland J.H. – London: Bradford, 1994. – 211 p.
10. Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs / Michalewicz Z. – Berlin, Heidelberg, New York, 1996. – 387 p.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2010