УДК 004.942

Ю.Б. Гриценко, О.И. Жуковский, О.Г. Загальский

Использование сетей Петри для оценки времени эвакуации людей в зданиях и сооружениях при возникновении пожара. Алгоритм

Предложен подход использования методологии стохастических и нечетких сетей Петри для оценки времени эвакуации в зданиях и сооружениях. Приведен алгоритм настройки сетей Петри для последующего моделирования времени эвакуации.

Ключевые слова: пожарная безопасность, математическая модель, потоковые сети, стохастические сети, нечеткие сети, сети Петри.

Введение

Актуальность данной работы обусловлена вступлением в силу с 1 мая 2009 г. Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Положения данного Федерального закона обязательны для исполнения любых стадий жизненного цикла объектов защиты; разработка, принятие, применение и исполнение федеральных законов о технических регламентах, содержащих требования пожарной безопасности, а также нормативных документов по пожарной безопасности; разработка технической документации на объекты защиты.

Для выполнения части 7 ст. 6 этого закона принято постановление Правительства РФ «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска». Расчеты по оценке пожарного риска проводятся путем сопоставления расчетных величин пожарного риска с соответствующими нормативными значениями пожарных рисков на основании:

- анализа пожарной опасности объекта защиты;
- определения частоты реализации пожароопасных ситуаций;
- построения полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- оценки последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития;
 - наличия систем обеспечения пожарной безопасности зданий, сооружений и строений.

Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий для определения расчетных величин пожарного риска утверждены расчетные методики [1].

На основании этих методик и постановления Правительства РФ авторами статьи предложено использовать для моделирования компонента расчета пожарного риска, такого как время эвакуации людей из зданий и сооружений при возникновении пожаров, стохастические и нечеткие потоковые сети Петри, которые, на взгляд авторов, наиболее полно отражают вероятностный характер пребывания людей в помещении.

Математическая модель расчета пожарного риска зданий и сооружений. Основным параметром для обеспечения безопасности людей при расчете пожарного риска является расчетный индивидуальный риск Q_B , который может быть меньше или равен нормируемому индивидуальному риску Q_N . Расчетный индивидуальный риск может быть вычислен по формуле

$$Q_B = Q_E \times P_1 \times (1 - P_2) \times (1 - P_3) , \qquad (1)$$

где Q_E — вероятность возникновения пожара в течение года; P_1 — вероятность присумствия людей в здании при функционировании в разное количество смен (0,33 — одна смена; 0,66 — две смены; 1 — три смены); P_2 — вероятность эффективной работы технических решений противопожарной защиты, направленных на обеспечение безопасности эвакуации людей; P_3 — вероятность эвакуации людей.

Вероятность эффективной работы технических решений противопожарной защиты P_2 , направленных на обеспечение безопасной эвакуации людей, рассчитывают по формуле

$$P_2 = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i), \qquad (2)$$

где n — число технических решений противопожарной защиты в здании; R_i — вероятность эффективного срабатывания i-го технического решения.

Вероятность эвакуации P_3 рассчитывают по формуле

$$P_3 = 1 - (1 - P_3) \times (1 - P_A)$$
, (3)

где $P_{\rm 3}$ — вероятность эвакуации по эвакуационным путям; $P_{\rm A}$ — вероятность покидания здания через аварийные выходы или с помощью иных средств спасения (0,03 — при наличии таких путей; 0,001 — при их отсутствии).

Вероятность P_{Θ} рассчитывается по формуле

$$P_{\Im} = egin{cases} rac{t_b - t_e}{t_0}, & ext{если} & t_e < t_b < t_e + t_0, \ 0,999, & ext{если} & t_e + t_0 \le t_b, \ 0, & ext{если} & t_e \ge t_b, \end{cases}$$

где t_b — время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара, имеющих предельно допустимые для людей значения (время блокирования путей эвакуации), мин; t_e — расчетное время эвакуации людей, мин; t_0 — интервал времени от возникновения пожара до начала эвакуации людей, мин.

При наличии в здании системы оповещения о пожаре t_0 принимают равным времени срабатывания системы с учетом ее инерционности. При отсутствии необходимых исходных данных для определения времени начала эвакуации в зданиях (сооружениях) без систем оповещения t_0 следует принимать равным 0,5 мин — для этажа пожара и 2 мин — для вышележащих этажей.

Если местом возникновения пожара является зальное помещение, где пожар может быть обнаружен одновременно всеми находящимися в нем людьми, то t_0 допускается принимать равным нулю, и первая строка формулы (4) опускается, а вторая строка приобретает строгое неравенство.

Таким образом, расчетный индивидуальный риск при пожаре в зданиях и сооружениях зависит от двух основных параметров: время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара и расчетного времени эвакуации людей.

В данной статье мы остановимся на моделировании расчетного времени эвакуации людей. Для моделирования этого параметра представим модель процесса эвакуации из здания/сооружения в формальном виде. Пусть S — объект эвакуации (здание или сооружение), которое может быть представлено в виде совокупности элементов $S = (S_0, M, C)$, где S_0 — множество общих характеристик здания; M — множество конструктивных элементов здания (помещения, коридоры, лестничные марши, тамбуры, дверные проемы и др.); C — множество людей в здании.

Pacчетное время эвакуации людей. Из множества конструктивных элементов M выделяется множество эвакуационных путей M_P . Каждый эвакуационный путь имеет две характеристики: длину a и ширину b ($M_{Pi}=\{a_i,b_i\}$). Длина и ширина каждого участка пути эвакуации принимаются по проекту здания. Длина пути по лестничным маршам измеряется по длине марша. Длина пути в дверном проеме принимается равной нулю.

В множестве C каждый элемент описывается тремя параметрами C_i = $\{x_0, y_0, g\}$. Координаты человека в помещении x_0 и y_0 в начальный момент времени задаются в соответствии со схемой расстановки людей в помещениях или равномерно по всей площади помещения с учетом расстановки технологического оборудования. Далее x_0 и y_0 преобразуются в одну координату x — расстояние от центра данного человека до конца эвакуационного участка. Средняя площадь горизонтальной проекции взрослого человека g принимается как 0,1 м 2 или 0,125 м 2 с учетом зимней одежды.

С использованием представленной модели можно определить расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий t_e по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей:

$$t_e = \sum_{i=1}^{n} t_i , {5}$$

где n — количество участков; t_i — время движения людского потока на первом участке, которое зависит от длины участка и скорости людского потока.

В свою очередь скорость потока на первом участке зависит от плотности потока на нем

$$D_1 = \frac{N_1 \times g}{l_1 \times b_1} \,, \tag{6}$$

где N_1 — число людей на первом участке; g — средняя площадь горизонтальной проекции взрослого человека; l_1 , b_1 — длина и ширина первого участка.

Скорость потоков на участках, следующих после первого, зависит от интенсивности потока, которая выражается зависимостью от интенсивности потока предшествующих участков:

$$q_i = \frac{\sum q_{i-1} \times b_{i-1}}{b_i} \,, \tag{7}$$

где q_i , q_{i-1} — интенсивности потоков на i-ом и предшествующих участках; b_i , $b_{i\cdot 1}$ — ширина i-го и предшествующего участка.

Из вышеописанного можно сделать вывод, что моделирование расчетного времени эвакуации людей тесно связано со структурой здания и его помещения. Наилучшими представлениями путей эвакуации могут служить графы. В нашем же случае авторы статьи предлагают взять за основу описания и моделирования процесса эвакуации механизм сетей Петри, который основан на графовом представлении. В частности, это потоковые и стохастические или нечеткие сети.

Несомненным достоинством сетей Петри является математически строгое описание модели. Это позволяет проводить их анализ с помощью современной вычислительной техники. Преимущества использования сетей Петри в моделировании:

- большие выразительные способности в представлении параллельных асинхронных систем:
- способность представления локального управления, параллельных, конфликтных, недетерминированных и асинхронных событий;
 - графическое представление сети;
 - понятность модели и легкость ее изучения;
 - возможность иерархического моделирования на их основе;
 - возможность описания системы на различных уровнях абстракции;
 - возможность представления системной иерархии;
 - возможность машинной поддержки в проектировании.

Представление с помощью потоковой сети. Дадим определение сети Петри. Сетью Петри называется двудольный ориентированный граф c=(M,T,*), где $M=\{M_i\}$, $T=\{t_i\}$ – конечные непустые множества вершин, называемые соответственно позициями (места) и переходами; * – отношение между вершинами, соответствующее дугам графа.

K потоковым сетям относятся интерпретированные регулярные сети, в которых переходы интерпретируются как операции (функции), места как очереди, а фишки как данные. Дополнительно принимаются следующие соглашения: переход с n входными местами может интерпретироваться n-местной операцией; имеется не явный, скрытый механизм организации очереди данных фишек в каждом месте [2].

В нашем случае фишками (данными) будут являться люди, которые накапливаются в помещениях (места, очереди). В качестве перехода используется функция, учитывающая время нахождения фишки в очереди (время движения человека по участку) с учетом плотности и интенсивности потока (6). Данное время прямо пропорционально длине участка и обратно пропорционально скорости потока людей на этом участке.

В моделируемой потоковой сети операция, соответствующая переходу, может исполниться, если хоть одна фишка присутствует в операции перехода, в которую она поступает, если она готова к этому (отработала задержку, равную времени нахождения в данном помещении). Это отличительная особенность потоковых сетей от асинхронного событийного управления — условие готовности привязано только к влиянию потоков данных, а не управляющим событиям.

Приведем пример, на котором изображены план эвакуации из помещений (рис. 1) и соответствующая ему потоковая сеть (рис. 2). Нотация сетей Петри предполагает использование диаграмм, состоящих из двух типов объектов: события (множество мест) и условия (переходы). В графическом представлении сетей переходы изображаются «барьерами», а места кружочками. Стрелками отображаются их непосредственные зависимости

[2]. Внутри кружочка могут быть отображены фишки или цифры, показывающие количество фишек (обычно если фишек больше трех, то отображаются цифры). Например, помещению с номером M_1 на рис. 1 соответствует кружок с номером M_1 на рис. 2. Дверные проемы также являются местами, проему M_{11} (см. рис. 1) соответствует кружок M_{11} (см. рис. 2). А t_1 – это условие перехода фишки из помещения M_1 в M_2 . Под фишками в нашем представлении мы будем понимать людей в помещении.

Переходы, моделируемые представляемыми потоками сетей, имеют один вход, следовательно, мы можем говорить о моделировании ординарными потоковыми сетями.

Маркировка сети может характеризоваться вектором $\mu = (\mu(M_1), ..., \mu(M_n))$, где n – число позиций сети Петри. Для сети, изображенной на рис. 2, вектор μ выглядит следующим образом: $\mu = (3, 0, 1, 0, 5, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)$.

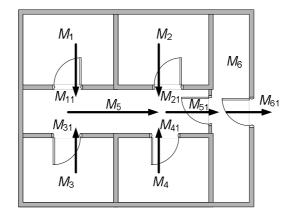


Рис. 1. Пример плана эвакуации из здания

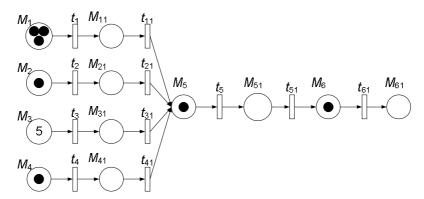


Рис. 2. Пример потоковой сети на основе плана эвакуации

Фактор наличия людей в помещении может носить как вероятностный, так и нечеткий характер. Одно из обобщений сетей Петри связано с реализацией в них дополнительных свойств, которые позволяют описывать в них неопределенность поведения систем в процессе их функционирования. Здесь могут быть предложены два подхода: описание неопределенности срабатывания переходов, находящихся в состоянии конфликта; описание неопределенности количества фишек в позициях [3].

Первый подход для решения поставленных задач не является актуальным, а второй является весьма значимым. Количество фишек во всех позициях сети определяют глобальное состояние системы. Неопределенность наличия фишек может быть описана как с вероятностных позиций, так и с позиций теории нечетких множеств [3].

Анализ процесса эвакуации людей стохастическими и нечеткими сетями Петри. Каждый из подходов (стохастический или нечеткий) может применяться для моделирования в нашей задаче для разных условий неопределенности.

Определим стохастическую потоковую сеть Петри. В определении стохастической потоковой сети $S=(c,\mu)$ присутствует два компонента: c=(M,T,*) и отображение $\mu: M \to N$, которое присваивает каждой позиции M_i определенное число фишек $\mu(M_i)$.

Как и в обычной сети Петри, в стохастической сети Петри при срабатывании переходов происходит процесс перераспределения фишек, который отражается в изменении векторов распределения вероятностей наличия фишек в позициях. Таким образом, на условие перехода в потоковой сети накладывается дополнительное вероятностное условие: переход $t_i \in T$ в стохастической сети $S = (c, \mu)$ разрешен, если у вектора вероятностей каждой входной позиции этого перехода имеется компонента, не равная нулю, с номером, равным или большим числу дуг, соединяющих данную позицию с переходом [3]. В нашей задаче сеть является ординарной, значит, вектор вероятностей может быть заменен одним скалярным значением вероятности, что существенно упрощает решение данной задачи.

Определим нечеткую потоковую сеть Петри. Нечеткой сетью Петри называется пара $S=(c,\mu)$, где c=(M,T,*) описывает структуру сети в отображение $\mu\colon M{\to}N$ присваивает каждой позиции M_i вектор распределения степеней принадлежности фишек к позиции $\mu(M_i)$.

Принципиальное отличие маркировки в нечетких сетях от маркировки в стохастических сетях состоит в том, что сумма компонент любого вектора распределения степеней принадлежности фишек может отличаться от единицы. Вместе с тем со структурной точки зрения маркировка в обоих классах сетей однотипна. Это дает основание предполагать, что правило разрешения переходов в нечетких сетях аналогично правилу в стохастических сетях [3].

Для проведения моделирования времени эвакуации людей в зданиях и сооружениях необходимо выполнить следующие действия:

- 1. Подготовить поэтажный план здания или сооружения.
- 2. Перевести поэтажный план в нотацию сетей Петри.
- 3. Задать условия переходов согласно математической модели.
- 4. Произвести первоначальную разметку сети (определить векторы распределения вероятностей наличия фишек/людей в позициях/помещениях).
 - 5. Запустить программу моделирования расчетного времени эвакуации людей.

Конечной целью теории сетей Петри является автоматический анализ свойств сетей, таких как ограниченность, живость, устойчивость и т.п.

Дадим описание характеристик моделируемой нами сети:

- 1. Моделируемая сеть является ограниченной любое место ограничено (здание и сооружение конечно), значит, множество допустимых разметок конечно.
- 2. Сеть не является безопасной, так как $\mu(M_i)$ (распределение степеней принадлежности того или иного человека к помещению) может принимать значения больше единицы для нечеткой потоковой сети.
- 3. Сеть является консервативной, т.е. сумма фишек во всех местах сети постоянна (количество людей в здании постоянно, предполагаем, что при эвакуации новые люди в здании не появляются). Процесс моделирования должен закончиться при достижении всех фишек в конечной позиции. Фишки не покидают сеть, они накапливаются в последней позиции.
- 4. В процессе моделирования сети, в зависимости от начальных условий, возможно появление мертвых переходов (переход, который может не сработать). То есть потенциально существуют тупиковые разметки µ, при которых люди за отведенное время не успевают покинуть помещение.
- 5. Переходы, существующие в сети, являются устойчивыми, так как сеть является ординарной и переходы не влияют на работу друг друга (каждый дверной проем или помещение функционирует независимо от другого дверного проема или помещения).

Выводы

- 1. Механизм нечетких и стохастических сетей Петри позволяет проводить моделирование времени эвакуации людей из зданий и сооружений при возникновении пожаров.
- 2. Моделируемая сеть Петри не является безопасной, в зависимости от начальных условий возможно появление мертвых переходов, что является проблемной ситуацией. Для решения данной ситуации необходимо смоделировать пути эвакуации таким образом, чтобы избежать появления мертвых переходов и выполнялось условие $t_e + t_0 \le t_b$ [см. формулу (4)]. Если этого нельзя добиться планированием перераспределения путей эвакуации, то требуется внесение конструктивных изменений в здания и сооружения. Например, строительство дополнительных пожарных выходов.

Планируется практическое применение данной работы для оценки пожарных рисков зданий и сооружений, находящихся на балансе Томского университета систем управления и радиоэлектроники, а также других сторонних заказчиков.

Литература

- 1. Методика оценки пожарного риска для общественных зданий. Нормативный документ в области независимой оценки рисков [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.pogaranet.ru/qa/477.html, свободный (дата обращения: 12.05.2010). 2. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической
- литературы, 1984. 160 с.
- 3. Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А. Лескин, П.А. Мальцев, А.М. Спиридонов. - Л.: Наука, 1989. - 133 с.

Гриценко Юрий Борисович

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизации обработки информации (АОИ) ТУСУРа

Тел.: (3822) 41-44-70

Эл. почта: ubg@muma.tusur.ru

Жуковский Олег Игоревич

Канд. техн. наук, доцент каф. АОИ ТУСУРа

Тел.: (3822) 41-44-70

Эл. почта: ol@muma.tusur.ru

Загальский Олег Гершович

Начальник службы безопасности ТУСУРа

Тел.: (3822) 52-87-18 Эл. почта: oleg58@mail.ru

Gritsehko Yu.B., Zhukovskiy O.I., Zagalskiy O.G.

The usage of Petri nets for the estimation of time of people's evacuation out of buildings and constructions in case of fire. The algorithm

There have been offered an approach of using the methodology of stochastic and indistinct Petri-nets for the estimation of evacuation time in buildings and constructions. The algorithm was suggested for the adjustment of Petri nets for subsequent modeling of evacuation time.

Keywords: fire safety, mathematical model, data-flow nets, stochastic nets, indistinct nets, Petri nets.