

ментом, решена задача идентификации их параметров и показано, что для величины постоянной времени, равной 0,2 с, погрешность рассогласования этих характеристик с характеристиками, определенными аналитически, не превышает 7%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Гвоздь В.М. Терморезистивные тепловые пожарные извещатели с улучшенными характеристиками и методы их температурных испытаний. – Х.: АГЗУ, 2005. – 121 с..
2. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики. – Х.: ХИПБ, 1993. – 288 с.

УДК 331. 101

*Стрелец В.М., канд. техн. наук, доц., УГЗУ,  
Бородич П.Ю., преп., УГЗУ*

### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АППАРАТА Е-СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ В МЕТРОПОЛИТЕНЕ**

(представлено д-ром физ.-мат. наук Яковлевым С.В.)

Использование аппарата Е-сетей позволяет при проведении имитационного моделирования аварийно-спасательных работ в метрополитене отразить закономерности их организации и проведения

**Постановка проблемы.** Процесс аварийно-спасательных работ в метрополитене (АСРМ) в случае возникновения там чрезвычайной ситуации представляет собой функционирование системы «спасатель – средства спасения и защиты – экстремальная среда на станциях метрополитена», которая обеспечивает спасение людей, в том числе из непригодной для дыхания среды, и ликвидацию чрезвычайной ситуации. Совершенствование рассматриваемого процесса требует его комплексной оценки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** С комплексных позиций процесс аварийно-спасательных работ как процесс функционирования сложной человеко-машинной системы

рассматривался в [1,2,3]. Там отмечено, что для объективной оценки такого процесса необходимо проанализировать большое количество взаимозависимых промежуточных работ, которые обеспечивают тушение, эвакуацию и спасание (при необходимости) пострадавших. Совокупность этих действий представляет сложную динамическую управляемую систему, исследование которой целесообразно делать с помощью соответствующей имитационной модели.

В то же время, модель боевых действий пожарных подразделений, разработанная в [4] для случая тушения пожара вагона, который находится на платформе, не рассматривает вопросы спасения пассажиров и сотрудников метрополитена, события в ней не носят вероятностный характер. Имитационная модель [5], опирающаяся на сети Петри, боевых действий по тушению звеном ГДЗС пожара на электроподстанции метрополитена, не подходит для большинства других аварийных и чрезвычайных ситуаций в метро, которые носят вероятностный характер развития ситуации.

Кроме этого, особенностями сетей Петри [6] является то, что переход не разрешается, если входная функция не обладает достаточным количеством маркеров, т.е. не выполнены все условия. Маркер должен быть помещен в каждую из его выходных позиций. Однако при АСРМ требуемые операции реализуются как при выполнении полного набора условий, так и при неполном выполнении некоторых из них (например, сотрудники станции должны включить эскалаторы на подъем, однако пассажиры могут эвакуироваться и по выключенным эскалаторам).

Развитием сетей Петри в направлении учета вероятностного характера развития рассматриваемой ситуации и расширения типов переходов является научно-методический аппарат Е-сетей [7], который состоит из четырех элементов: множества позиций, множество переходов, входных и выходных функций. Характерной особенностью этого аппарата является введение дополнительных элементов, представляющих собой макропозиции. Последние представляют собой некоторые подсети, которые на верхнем уровне можно рассматривать как простые позиции. Одной из самых важных макропозиций, вводящихся в Е-сетях, является генератор, который представляет собой краевую неконечную позицию сети, обеспечивающей появление маркеров во времени согласно какому-либо закону. При этом можно применять как постоянную периодическую генерацию, так и генерации, основанные на любых

---

Анализ возможностей аппарата Е-сетей для проведения имитационного моделирования аварийно-спасательных работ в метрополитене

законах случайного распределения (равномерном, нормальном, экспоненциальном, Пуассона, Эрланга...).

**Постановка задачи и ее решение.** Исходя из этого, поставлена задача проверки возможностей использования переходов конкретного типа, реализуемых аппаратом Е-сетей, для описания типовых ситуаций, которые имеют место в процессе проведения АСРМ, с последующей разработкой соответствующего графа.

Ниже приводится анализ возможностей использования переходов конкретного типа, реализуемых аппаратом Е-сетей, для описания типовых ситуаций, которые могут иметь место в ходе АСРМ. За основу была взята совокупность мероприятий, рассмотренная в [8].

Так, например, Т-переход запускается, или когда при свободной выходной позиции маркер попадает во входную позицию, или когда при занятой входной позиции маркер покидает выходную позицию. В модели такой переход реализуется в самом начале: входной позицией будет  $p_1$  – обнаружение пожара, переходом будет  $t_1$  – оповещение машиниста о пожаре и выходной позицией –  $p_2$  – машинист оповещен (здесь и далее  $t_k$  -  $k$ -тое действие, а  $p_e$  -  $e$ -тое условие).

Условные переходы объединения описываются с помощью J-перехода, при запуске которого должны выполняться два входных условия. Данный тип перехода целесообразно использовать для моделирования ситуаций, примером которой будет случай, когда движению газодымозащитников на станцию (действие  $t_{19}$ ) должно предшествовать соединение спасателей сцепкой (условие  $p_{31}$ ) и получение допуска на вход от сотрудников станции (условие  $p_{32}$ ). Выходным условием  $p_{33}$  является достаточное количество воздуха или кислорода в изолирующих аппаратах и подготовленность спасателей.

Ситуация раздвоения может быть реализована с помощью F-перехода, поскольку при его запуске может быть образован новый маркер. Обе выходные позиции F-перехода должны быть свободными для того, чтобы переход мог быть запущен маркером из входной позиции. После запуска F-перехода обе выходные позиции заняты, а входная позиция свободна. Выполнение F-перехода происходит при моделировании подготовки горноспасателей к работе  $t_{26}$ . Входным условием будет  $p_{40}$  – горноспасатели прибыли, а исходящими условиями будут  $p_{41}$  – представитель горноспасате-

лей готов включиться в работу штаба и  $p_{44}$  – горноспасатели готовы спускаться на станцию.

T-, J-, F-переходы запускаются только тогда, когда все входные позиции маркированы, а выходные – свободны. При этом по истечении времени запуска перехода все выходные позиции маркируются, а маркировка входных позиций упраздняется. Атрибуты маркера в выходных позициях определяются с помощью процедуры перехода.

Для ситуации, когда нужно выбрать одну из двух альтернативных позиций, в аппарате E-сетей используется X-переход, который определяет один из двух возможных путей продвижения маркера. Если альтернативная позиция пуста, то следует выбрать путь "A→C"; если альтернативная позиция занята, то выбирается путь "A→D". Примером X -перехода для модели будет  $t_{37}$  – включение аварийного режима вентиляции. Условием для выполнения этого действия будет  $p_{37}$  – сотрудники метрополитена знают о необходимости включения аварийного режима вентиляции. В свою очередь это действие порождает следующие условия:  $p_{63}$  – дым удален и  $p_{64}$  – вентиляция не справляется с дымом.

Y-переход используется аналогично T-переходу, однако при этом, не считая альтернативной позиции, занимается только одна входная позиция. Если одновременно заняты две входные позиции, то приоритет устанавливается альтернативной позицией. Если при этом альтернативная позиция не определена, то приоритет устанавливается по старшинству. Примером использования перехода в имитационной модели будет ситуация  $t_{43}$  – движение сотрудников станции, участвовавших в тушении пожара к выходу. Первым условием для выполнения перехода может быть  $p_{20}$  – сотрудники станции не умеют соединить рукава или нет стволов и рукавов на станции, другим условием –  $p_{22}$  – осложнение обстановки на пожаре.

В табл. 1 приведены схемные реализации простых переходов, которые имеют место в процессе АСРМ. Для более сложных случаев в модели используются макро-переходы (табл. 2).

Так, макро-J-переход (MJ) и макро-F-переход (MF) имеют больше двух входных или выходных позиций. Оба типа перехода запускаются только тогда, когда все входные позиции заняты, а все выходные пусты. Время запуска и процедура перехода одинаково определяется для простых и макро-переходов. Примером использования макро-J-перехода (MJ) служит  $t_{38}$  - движение пасса-

жиров вместе с сотрудниками станции по соседнему тоннелю на другую станцию или к вентиляционным камерам. Он реализуется лишь при выполнении следующих условий:  $p_{61}$  - пассажиры готовы эвакуироваться по тоннелю,  $p_{62}$  - сотрудники метрополитена знают о допустимости эвакуации пассажиров по соседнему тоннелю на другую станцию или через вентиляционные шахты,  $p_{63}$  - дым в эвакуационном тоннеле отсутствует. Выходным условием будет  $p_{65}$  – сотрудники метрополитена вывели пассажиров к вентиляционной камере или на соседнюю станцию. Макро-F-переход (MF) в модели реализуется, например, как  $t_2$  – действие машиниста по инструкции. Входная позиция:  $p_2$  – машинист оповещен о ЧС, выходные позиции:  $p_3$  - диспетчер станции оповещен,  $p_4$  - машинист готов ликвидировать ЧС подручными средствами,  $p_5$  - машинист может по громкоговорящей связи оповестить пассажиров об их действиях.

Аналогично, макро-X-переход (например,  $t_6$  - анализ машинистом результатов тушения огнетушителями из кабины; входное условие  $p_8$  - машинист приостанавливает тушение пожара огнетушителями, а выходное условие – любое из:  $p_9$  - пожар не потушен, но огнетушители в кабине еще есть;  $p_{10}$  - пожар потушен машинистом огнетушителями из кабины;  $p_{11}$  - пожар не потушен, при этом нет заряда в огнетушителях из кабины) и макро-Y-переход (например, действие  $t_7$  - движение сотрудников метрополитена к пожарному крану; выполняется при любом из:  $p_7$  - нет огнетушителей в кабине или машинист не умеет ими пользоваться,  $p_{11}$  - пожар не потушен, при этом нет заряда в огнетушителях из кабины,  $p_{13}$  - отсутствие рабочих огнетушителей на станции или персонал станции не умеет пользоваться ими,  $p_{17}$  - пожар не потушен, нет заряда в огнетушителях со станции; переходом порождается  $p_{19}$  - сотрудники метрополитена подбежали к пожарному крану) являются простыми расширениями X- и Y- переходов. Однако значение альтернативной позиции макро-перехода определяется несколько иначе, чем для простейших переходов. Если, например, макро-X-переход имеет  $n$  выходных позиций, то значение альтернативной позиции этого перехода изменяется от 1 до  $n$ . Если альтернативная позиция указывает на позицию с номером  $m$ , а эта позиция пуста, то опрашиваются циклически все входные или выходные позиции.

**Таблиця 1 – Схеми простих переходов**

Тип переходу	Графічне представлення	Схема
Т-переход (виконання) T( A, C )		$(1,0) \rightarrow (0,1)$
Ж-переход (об'єднання) J( A, B, C )		$(1,1,0) \rightarrow (0,0,1)$
Ф-переход (роздвоєння) F( A, C, D )		$(1,0,0) \rightarrow (0,1,1)$
Х-переход (розділення на частини) X( R, A, C, D )		$(0,1,0,0) \rightarrow (E,0,1,0)$ $(0,1,0,1) \rightarrow (E,0,1,1)$ $(0,1,1,0) \rightarrow (E,0,1,1)$ $(1,1,0,0) \rightarrow (E,0,0,1)$ $(1,1,1,0) \rightarrow (E,0,1,1)$ $(1,1,0,1) \rightarrow (E,0,1,1)$
У-переход (вибір) Y( R, A, B, C )		$(0,1,0,0) \rightarrow (E,0,0,1)$ $(0,1,1,0) \rightarrow (E,0,1,1)$ $(0,0,1,0) \rightarrow (E,0,0,1)$ $(1,0,1,0) \rightarrow (E,0,0,1)$ $(1,1,1,0) \rightarrow (E,1,0,1)$ $(1,1,0,0) \rightarrow (E,0,0,1)$

Изложенное выше позволяет граф имитационной модели АСРМ, опирающейся на использование аппарата Е-сетей, представить в виде, который приведен на рис. 1. Начальным событием модели является событие «ЧС обнаружена», заканчиваются АСР событием «Оказание медицинской помощи пострадавшим».

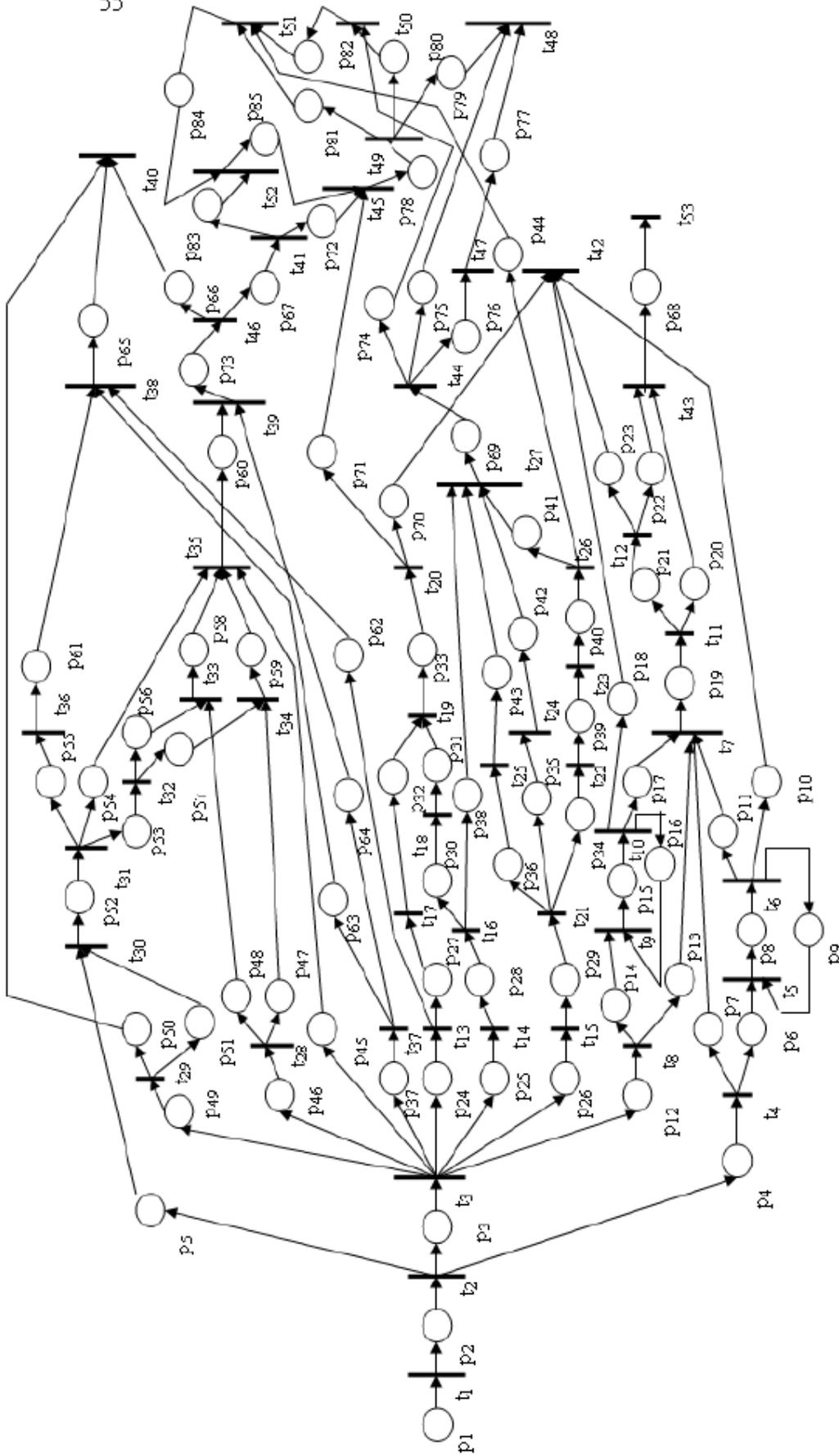


Рис. 1 – Граф имитационной модели проведения аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена

на

**Таблиця 2 – Схеми макропереходов**

Тип переходу	Графічне представлення	Схема
MJ-переход (об'єднання) $MJ(A_1, \dots, A_n, B)$		$(1, \dots, 1, 0) \rightarrow (0, \dots, 0, 1)$
MF-переход (розмноження) $MF(A, B_1, \dots, B_n)$		$(1, 0, \dots, 0) \rightarrow (0, 1, \dots, 1)$
MX-переход (розділення на частини) $MX(R, A, B_1, \dots, B_n)$		$(m, 1, F, \dots, 0, \dots, F) \rightarrow$ $\quad \quad \quad \backslash$ $\quad \quad \quad B_m$ $\quad \quad \quad /$ $(E, 0, F, \dots, 1, \dots, F)$
MY-переход (вибір) $MY(R, A_1, \dots, A_n, B)$		$(m, F, \dots, 1, F, \dots, F, 0) \rightarrow$ $\quad \quad \quad \backslash$ $\quad \quad \quad A_m$ $\quad \quad \quad /$ $(E, F, \dots, 0, F, \dots, F, 1)$  $(m, F, \dots, 0, 1, F, \dots, 0) \rightarrow$ $\quad \quad \quad / \quad \backslash$ $\quad \quad \quad A_m \quad A_t$ $\quad \quad \quad \backslash \quad /$ $(E, F, \dots, 0, 0, F, \dots, 1)$

**Висновки.** Показано, що особенністю імітаційного моделювання аварійно-спасальних робіт в метрополітені являється можливість представлення розглянутого процесу в вигляді Е-графу з різними типами переходів (простими, умовними,

раздвоения, альтернативными), тупиками, замкнутыми циклами и вероятностным характером развития ситуации.

Использование аппарата Е-сетей позволило разработать графическую модель, в которой впервые отражены закономерности организации и проведения аварийно-спасательных работ в метрополитене.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Чучковский В.Н., Стрелец В.М. Имитационная оценка деятельности боевых расчетов пожарных автомобилей // Эргономика на автомобильном транспорте: Сб. науч. тр. – Харьков, ХГАДТУ, 1997. – С. 92-95.
2. Чучковский В.Н. Разработка методов обоснования штатной численности боевых расчетов пожарных автомобилей: Диссертация, канд.техн.наук: 21.06.02; - Защищена 21.04.1998; Затв. 21.07.1998. // ХИПБ.– Харьков, 1998.– 155 с.
3. Стрелец В.М., Грицай В.Б. Статистический метод обоснования нормативов боевого развертывания пожарно-технического вооружения // Право і безпека: Науковий журнал – 2002. – Вип.1. –С.165-171.
4. Даниленко А.С. Модель боевых действий пожарных подразделений // Пожарная опасность подвижного состава метрополитенов и железных дорог: Сб.науч.тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. С. 46 –53.
5. Бондарев В.Ф., Семенов В.В. Имитационное моделирование боевых действий по тушению пожаров на электроподстанциях метрополитена // Пожарная безопасность метрополитенов: Сб.науч.тр. – М.: ВНИИПО, 1989. – С. 44-59.
6. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984.- 171 с.
7. Костин А.Е. Принципы моделирования сложных дискретных систем. – М.: Изд. МИЭТа, 1983. – 107с.
8. Стрелець В.М., Бородич П.Ю. Імітаційна оцінка ефективності пожежогасіння на станціях метрополітену// Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб.– К.: Техніка, 2004. – Вип. 55. - С. 229-239.

nuczu.edu.ua