

А. А. ТАРАНЦЕВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; e-mail: t_54@mail.ru)

А. Л. ХОЛОСТОВ, д-р техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: holostov@mail.ru)

А. П. НОДЬ, аспирант, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: psp.psoor@mail.ru)

А. А. ТАРАНЦЕВ, преподаватель кафедры пожарной тактики и службы, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: dask_cradle@mail.ru)

УДК 614.84

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОСТАТОЧНОСТИ МОБИЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ СИТУАЦИЙ ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

Разработаны математические модели функционирования системы ликвидации опасных ситуаций (пожаров, наводнений, ДТП и др.), требующих оперативного привлечения ограниченного числа (2–3) мобильных подразделений соответствующих экстренных служб. Показано, что они позволяют определить необходимое количество привлекаемых мобильных подразделений для ликвидации различных опасных ситуаций. Определены критические состояния такой системы, когда мобильные подразделения не смогут быть привлечены. Показана возможность решения задач анализа и синтеза данной системы.

Ключевые слова: опасная ситуация; мобильные подразделения; экстренные службы; граф состояния системы; вероятность отказов.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.59-66

Современный этап развития общества характеризуется возникновением все большего числа различных опасных ситуаций (пожаров, наводнений, ДТП и др.), требующих оперативного привлечения мобильных подразделений экстренных служб — пожарных, скорой медицинской помощи (СМП), спасателей, полиции и др. [1–3]. Это относится как к промышленным предприятиям и населенным пунктам [4, 5], так и к крупным дорожным магистралям и объектам в Арктической зоне [6, 7].

В одном случае для локализации и ликвидации опасной ситуации (например, пожара) требуется привлечение только одного мобильного подразделения (например, пожарного караула), в другом, более сложном, случае — двух подразделений, в еще более сложном — трех (например, пожар по повышенному номеру [8]).

В связи с этим представляется целесообразным провести моделирование процессов приема — обслуживания вызовов с целью определения необходимого числа мобильных подразделений для ликвидации опасных ситуаций с гарантированной ве-

роятностью, а также оценки вероятностей состояний системы “опасные ситуации — подразделения экстренных служб”, что позволит спланировать места их дислокации [9].

Для решения данных задач может быть использован математический аппарат исследования операций и теории массового обслуживания [10]. При этом составляется перечень состояний $\{S\}$ исследуемой системы (в данном случае “опасные ситуации — мобильные подразделения”), и из анализа статистики определяются средние значения времени $\{t\}$ перехода системы из одного состояния в другое. Полагая, что величины $\{t\}$ случайны и подчинены экспоненциальным законам распределения [11, 12], можно получить векторы интенсивностей переходов $\{\lambda\}$ и $\{\mu\}$, являющихся параметрами экспоненциальных законов распределения.

Вектор $\{\lambda\}$ обуславливает частоту возникновения опасных ситуаций. В него входят параметры: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — частота возникновения ситуаций, требующих привлечения соответственно одного, двух, трех мобильных подразделений и т. д. Вектор $\{\mu\}$

отражает скорости ликвидаций опасных ситуаций и содержит параметры: μ_1, μ_2, μ_3 — скорость ликвидации ситуаций, требующих привлечения соответственно одного, двух, трех мобильных подразделений и т. д.

На рис. 1–6 приведены графы переходов для системы “опасные ситуации – мобильные подразделения” при различных количествах n мобильных подразделений*, когда возможны ситуации, требующие привлечения одного или двух мобильных подразделений экстренных служб. Системы из m уравнений в предположении о стационарности процессов, соответствующие графам переходов на рис. 1–6 и содержащие вероятности $\{p\}$ состояний $\{S\}$, приведены в табл. 1. Там же приведены критические вероятности отказов: $p_{\text{отк}}$ — вероятность состояния $S_{\text{отк}}$, когда заняты все подразделения (каналы обслуживания) и ни на какую вновь возникшую опасную ситуацию ни одно мобильное подразделение отправлено быть не может; p_{II} — вероятность состояния S_{II} , когда на возникшую ситуацию, требующую привлечения одновременно двух подразделений, они не могут быть высланы.

На рис. 7–9 приведены графы переходов, когда возможны ситуации, требующие привлечения одного мобильного подразделения либо двух или трех

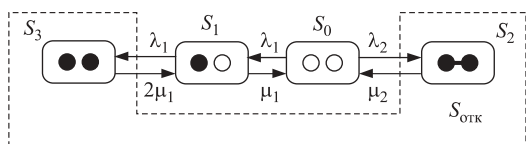


Рис. 1. Граф переходов для двухканальной системы ($n = 2$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов: ○ — канал обслуживания свободен; ● — канал обслуживает один вызов; ●—● — вызов обслуживают сразу два канала; $S_{\text{отк}}$ — полный отказ (ни один вызов не принимается к обслуживанию); $S_{\text{II}} = S_{\text{отк}} \cup S_1$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова

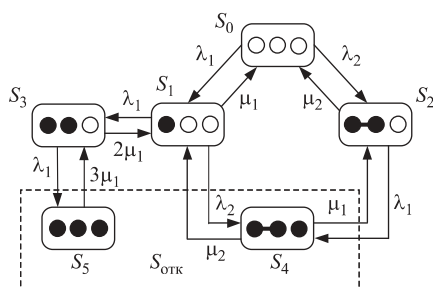


Рис. 2. Граф переходов для трехканальной системы ($n = 3$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов (обозначения см. на рис. 1): $S_{\text{II}} = S_{\text{отк}} \cup S_2 \cup S_3$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова

* В теории массового обслуживания принято использовать термин “канал обслуживания”, аналогичный понятию “мобильное подразделение”.

подразделений одновременно. В табл. 2 приведены вероятности $\{p\}$ соответствующих состояний $\{S\}$, а также вероятности критических состояний $p_{\text{отк}}$, p_{II} и p_{III} . Вероятность p_{III} соответствует состоянию S_{III} , когда возникает отказ в одновременном прибытии трех подразделений (например, пожар по повышенному номеру), если того требует вновь возникшая опасная ситуация.

Решение систем линейных алгебраических уравнений, приведенных в табл. 1 и 2, с целью опреде-

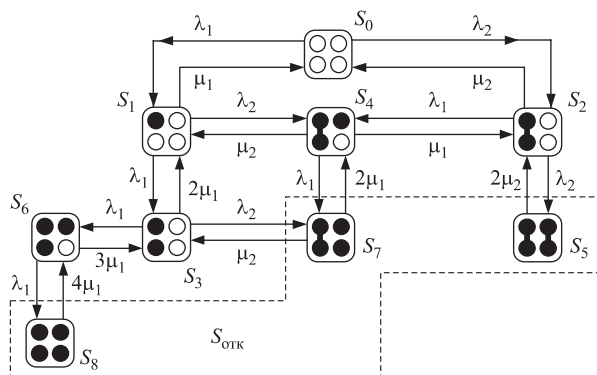


Рис. 3. Граф переходов для четырехканальной системы ($n = 4$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов (обозначения см. на рис. 1): $S_{\text{II}} = S_{\text{отк}} \cup S_4 \cup S_6$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова

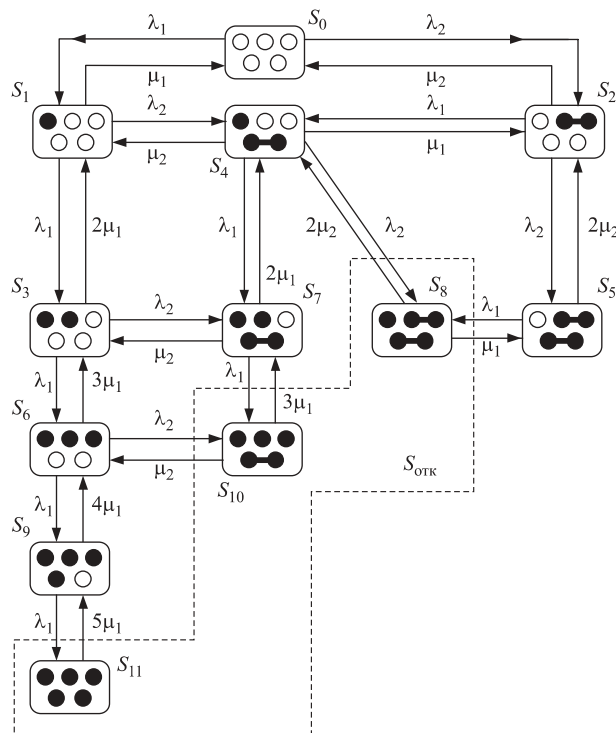


Рис. 4. Граф переходов для пятиканальной системы ($n = 5$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов (обозначения см. на рис. 1): $S_{\text{II}} = S_{\text{отк}} \cup S_5 \cup S_7 \cup S_9$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова

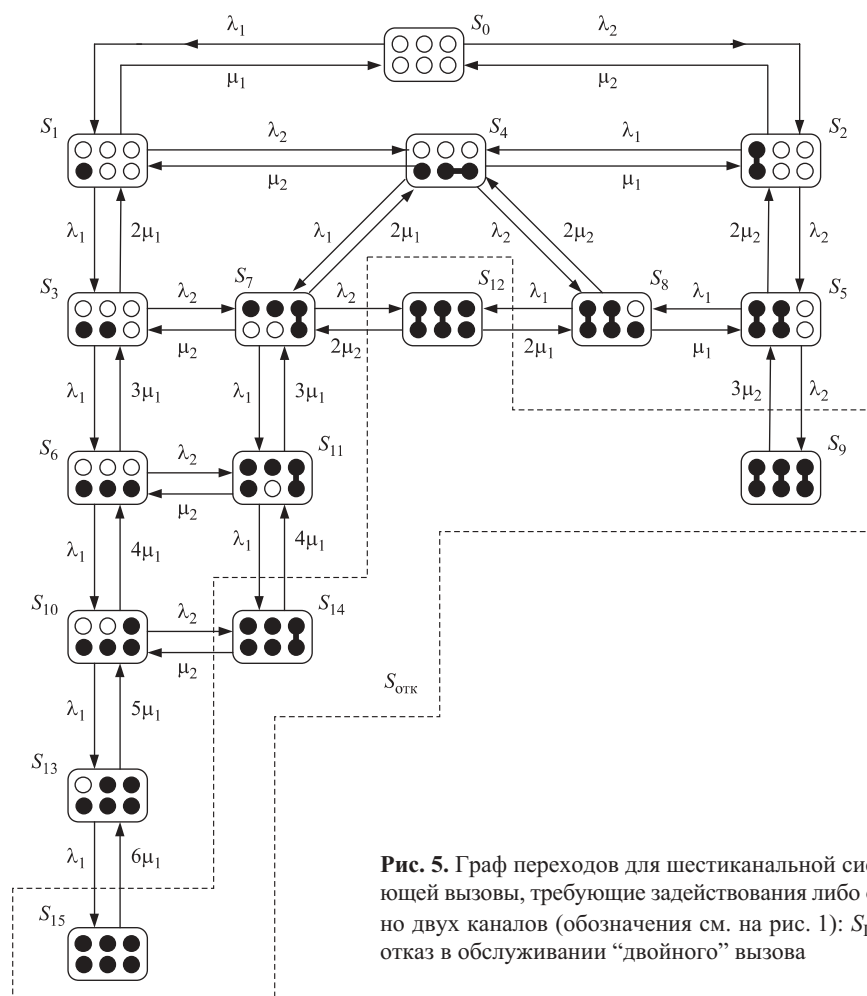


Рис. 5. Граф переходов для шестиканальной системы ($n = 6$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов (обозначения см. на рис. 1): $S_{II} = S_{отк} \cup S_8 \cup S_{11} \cup S_{13}$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова

Таблица 1. Системы алгебраических уравнений согласно графам на рис. 1–6

n	m	Система уравнений	Примечания
2	4	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3;$ $0 = \lambda_2 p_0 - \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_1 - 2\mu_1 p_3$	Аналитическое решение: $p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + 0,5\alpha_1^2;$ $p_1 = \alpha_1 p_0; p_2 = \alpha_2 p_0;$ $p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0;$ $p_{отк} = (\alpha_2 + 0,5\alpha_1^2) p_0;$ $p_{II} = p_{отк} + p_1$
3	5	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; 0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4; 0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_5;$ $0 = \lambda_2 p_1 - (\mu_1 + \mu_2)p_4 + \lambda_1 p_2; 0 = \lambda_1 p_3 - 3\mu_1 p_5$	$p_{отк} = p_4 + p_5;$ $p_{II} = p_{отк} + p_2$
4	9	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; 0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5; 0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_1)p_4 + 2\mu_1 p_7; 0 = \lambda_2 p_2 - 2\mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_1 p_3 - (3\mu_1 + \lambda_1)p_6 + 4\mu_1 p_8; 0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\mu_2 + 2\mu_1)p_7; 0 = \lambda_1 p_6 - 4\mu_1 p_8$	$p_{отк} = p_5 + p_7 + p_8;$ $p_{II} = p_{отк} + p_6$
5	12	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; 0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5; 0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_4 + 2\mu_1 p_7 + 2\mu_2 p_8;$ $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + 2\mu_2)p_5 + \mu_1 p_8; 0 = \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_6 + 4\mu_1 p_9 + \mu_2 p_{10};$ $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \mu_2 + 2\mu_1)p_7 + 3\mu_1 p_{10}; 0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (2\mu_2 + \mu_1)p_8;$ $0 = \lambda_1 p_6 - (4\mu_1 + \lambda_1)p_9 + 5\mu_1 p_{11}; 0 = \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_7 - (\mu_2 + 3\mu_1)p_{10}; 0 = \lambda_1 p_9 - 5\mu_1 p_{11}$	$p_{отк} = p_8 + p_{10} + p_{11};$ $p_{II} = p_{отк} + p_7 + p_9$

<i>n</i>	<i>m</i>	Система уравнений	Примечания
6	15	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2$; $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4$; $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5$; $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7$; $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_4 + 2\mu_1 p_7 + 2\mu_2 p_8$; $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_2)p_5 + \mu_1 p_8 + 3\mu_2 p_9$; $0 = \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_6 + 4\mu_1 p_{10} + \mu_2 p_{11}$; $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + 2\mu_1)p_7 + 3\mu_1 p_{11} + 2\mu_2 p_{12}$; $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (\lambda_1 + 2\mu_2 + \mu_1)p_8 + 2\mu_1 p_{12}$; $0 = \lambda_2 p_5 - 3\mu_2 p_9$; $0 = \lambda_1 p_6 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 4\mu_1)p_{10} + 5\mu_1 p_{13} + \mu_2 p_{14}$; $0 = \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_7 - (\lambda_1 + \mu_2 + 3\mu_1)p_{11} + 4\mu_1 p_{14}$; $0 = \lambda_2 p_7 + \lambda_1 p_8 - (2\mu_2 + 2\mu_1)p_{12}$; $0 = \lambda_1 p_{10} - (\lambda_1 + 5\mu_1)p_{13} + 6\mu_1 p_{15}$; $0 = \lambda_2 p_{10} + \lambda_1 p_{11} - (\mu_2 + 4\mu_1)p_{14}$; $0 = \lambda_1 p_{13} - 6\mu_1 p_{15}$	$P_{\text{отк}} = p_9 + p_{12} + p_{14} + p_{15}$; $P_{\text{II}} = P_{\text{отк}} + p_{13}$
7	20	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2$; $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4$; $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5$; $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7$; $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_4 + 2\mu_1 p_7 + 2\mu_2 p_8$; $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_2)p_5 + \mu_1 p_8 + 3\mu_2 p_9$; $0 = \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_6 + 4\mu_1 p_{10} + \mu_2 p_{11}$; $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + 2\mu_1)p_7 + 3\mu_1 p_{11} + 2\mu_2 p_{12}$; $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (\lambda_1 + 2\mu_2 + \mu_1)p_8 + 2\mu_1 p_{12}$; $0 = \lambda_2 p_5 - (\lambda_1 + 3\mu_2)p_9 + \mu_1 p_{13}$; $0 = \lambda_1 p_6 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 4\mu_1)p_{10} + 5\mu_1 p_{14} + \mu_2 p_{15}$; $0 = \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + 3\mu_1)p_{11} + 4\mu_1 p_{15} + 2\mu_2 p_{16}$; $0 = \lambda_2 p_7 + \lambda_1 p_8 - (\lambda_1 + 2\mu_2 + 2\mu_1)p_{12} + 3\mu_1 p_{16}$; $0 = \lambda_1 p_9 - \mu_1 p_{13}$; $0 = \lambda_1 p_{10} - (\lambda_1 + \lambda_2 + 5\mu_1)p_{14} + 6\mu_1 p_{17} + \mu_2 p_{18}$; $0 = \lambda_2 p_{10} + \lambda_1 p_{11} - (\lambda_1 + \mu_2 + 4\mu_1)p_{15} + 5\mu_1 p_{18}$; $0 = \lambda_2 p_{11} + \lambda_1 p_{12} - (2\mu_2 + 3\mu_1)p_{16}$; $0 = \lambda_1 p_{14} - (\lambda_1 + 6\mu_1)p_{17} + 7\mu_1 p_{19}$; $0 = \lambda_2 p_{14} + \lambda_1 p_{15} - (\mu_2 + 5\mu_1)p_{18}$; $0 = \lambda_1 p_{17} - 7\mu_1 p_{19}$	$P_{\text{отк}} = p_{13} + p_{16} + p_{18} + p_{19}$; $P_{\text{II}} = P_{\text{отк}} + p_{12} + p_{15} + p_{17}$

Примечание. $\alpha_1 = \lambda_1/\mu_1$; $\alpha_2 = \lambda_2/\mu_2$ — приведенные нагрузки.

Таблица 2. Системы алгебраических уравнений согласно графам на рис. 7–9

<i>n</i>	<i>m</i>	Система уравнений	Примечания
3	7	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3$; $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5$; $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_5$; $0 = \lambda_3 p_0 - \mu_3 p_3$; $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + 2\mu_1)p_4 + 3\mu_1 p_6$; $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_2 + \mu_1)p_5$; $0 = \lambda_1 p_4 - 3\mu_1 p_6$	Аналитическое решение: $p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 +$ $+ 0,5\alpha_1^2 + \alpha_1\alpha_2 + \alpha_1^2\alpha_3/6$; $p_1 = \alpha_1 p_0$; $p_2 = \alpha_2 p_0$; $p_3 = \alpha_3 p_0$; $p_4 = 0,5\alpha_1^2 p_0$; $p_5 = \alpha_1 \alpha_2 p_0$; $p_6 = p_0 \alpha_1^2 \alpha_3 / 6$; $P_{\text{отк}} = p_3 + p_5 + p_6$; $P_{\text{II}} = P_{\text{отк}} + p_2 + p_4$; $P_{\text{III}} = P_{\text{II}} + p_1$
4	11	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3$; $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5 + \mu_3 p_6$; $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_5 + 2\mu_2 p_7$; $0 = \lambda_3 p_0 - (\lambda_1 + \mu_3)p_3 + \mu_1 p_6$; $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_4 + 3\mu_1 p_8 + \mu_2 p_9$; $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_1)p_5 + 2\mu_1 p_9$; $0 = \lambda_3 p_1 + \lambda_1 p_3 - (\mu_3 + \mu_1)p_6$; $0 = \lambda_2 p_2 - 2\mu_2 p_7$; $0 = \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + 3\mu_1)p_8 + 4\mu_1 p_{10}$; $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (2\mu_1 + \mu_2)p_9$; $0 = \lambda_1 p_8 - 4\mu_1 p_{10}$	$P_{\text{отк}} = p_6 + p_7 + p_9 + p_{10}$; $P_{\text{II}} = P_{\text{отк}} + p_3 + p_5 + p_8$; $P_{\text{III}} = P_{\text{II}} + p_2 + p_4$
5	16	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3$; $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5 + \mu_3 p_6$; $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_5 + 2\mu_2 p_6 + \mu_3 p_8$; $0 = \lambda_3 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)p_3 + \mu_1 p_7 + \mu_2 p_8$; $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\mu_1)p_4 + 3\mu_1 p_9 + \mu_2 p_{10} + \mu_3 p_{12}$; $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_5 + 2\mu_1 p_{10} + 2\mu_2 p_{11}$; $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + 2\mu_2)p_6 + \mu_1 p_{11}$; $0 = \lambda_3 p_1 + \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \mu_3 + \mu_1)p_7 + 2\mu_1 p_{12}$; $0 = \lambda_3 p_2 + \lambda_2 p_3 - (\mu_3 + \mu_2)p_8$; $0 = \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_9 + 4\mu_1 p_{13} + \mu_2 p_{14}$; $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (\lambda_1 + \mu_2 + 2\mu_1)p_{10} + 3\mu_1 p_{14}$; $0 = \lambda_2 p_5 + \lambda_1 p_6 - (2\mu_2 + \mu_1)p_{11}$; $0 = \lambda_3 p_4 + \lambda_1 p_7 - (\mu_3 + 2\mu_1)p_{12}$; $0 = \lambda_1 p_9 - (\lambda_1 + 4\mu_1)p_{13} + 5\mu_1 p_{15}$; $0 = \lambda_2 p_9 + \lambda_1 p_{10} - (\mu_2 + 3\mu_1)p_{14}$; $0 = \lambda_1 p_{13} - 5\mu_1 p_{15}$	$P_{\text{отк}} = p_8 + p_{11} + p_{12} +$ $+ p_{14} + p_{15}$; $P_{\text{II}} = P_{\text{отк}} + p_6 + p_7 + p_{10} + p_{13}$; $P_{\text{III}} = P_{\text{II}} + p_3 + p_5 + p_9$

Примечание. $\alpha_1 = \lambda_1/\mu_1$; $\alpha_2 = \lambda_2/\mu_2$; $\alpha_3 = \lambda_3/\mu_3$ — приведенные нагрузки.

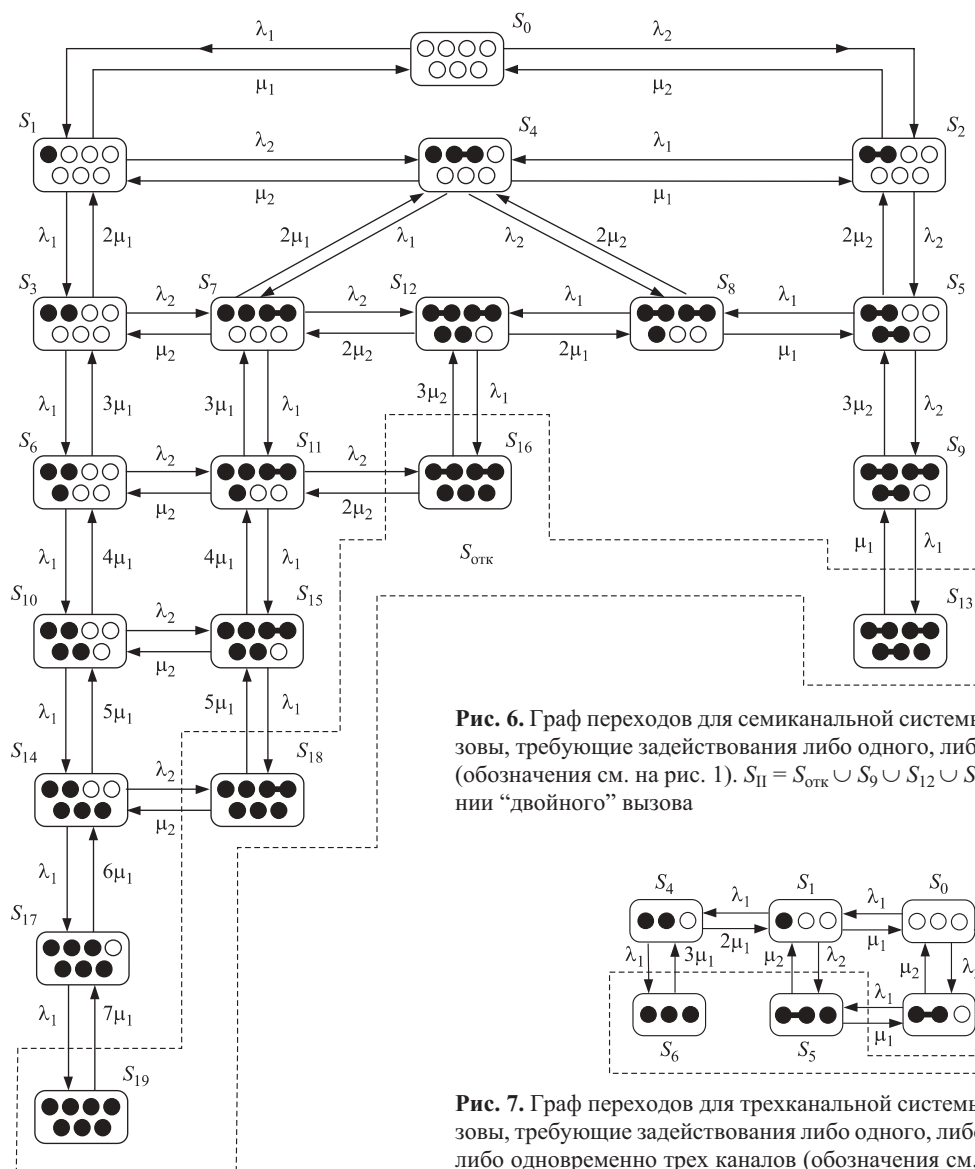


Рис. 6. Граф переходов для семиканальной системы ($n = 7$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов (обозначения см. на рис. 1). $S_{II} = S_{отк} \cup S_9 \cup S_{12} \cup S_{15} \cup S_{17}$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова

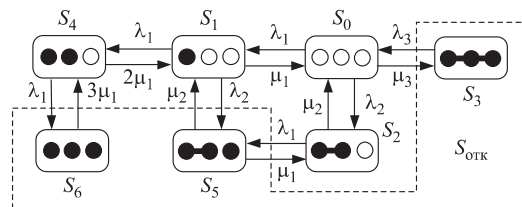
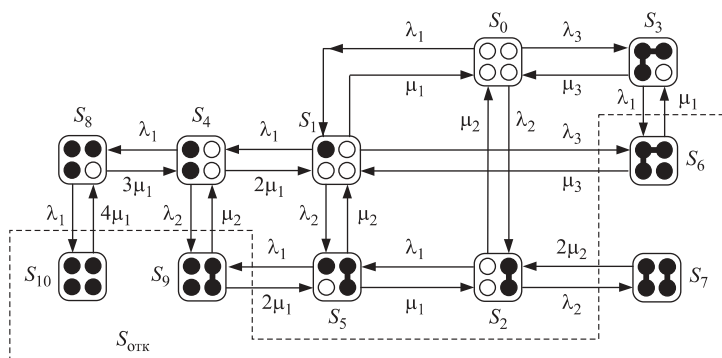


Рис. 7. Граф переходов для трехканальной системы ($n = 3$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух, либо одновременно трех каналов (обозначения см. на рис. 1): ●—●—● — вызов обслуживают сразу три канала; $S_{II} = S_{отк} \cup S_2 \cup S_4$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова, $S_{III} = S_{II} \cup S_1$ — отказ в обслуживании “тройного” вызова

Рис. 8. Граф переходов для четырехканальной системы ($n = 4$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов, либо трех каналов (обозначения см. на рис. 1 и 7); $S_{II} = S_{отк} \cup S_3 \cup S_5 \cup S_8$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова, $S_{III} = S_{II} \cup S_2 \cup S_4$ — отказ в обслуживании “тройного” вызова



ления вероятностей $\{p\}$ состояний $\{S\}$, в общем случае возможно численными методами или с использованием специальных компьютерных программ. Тем не менее в частных случаях существуют и аналитические решения, которые также представлены в табл. 1 и 2.

На практике с использованием вероятностей состояний могут решаться задачи анализа и синтеза системы ликвидации опасных ситуаций с привлечением мобильных подразделений экстренных служб [4, 5, 12]. В первом случае (задача анализа) по известным интенсивностям $\{\lambda\}$ и $\{\mu\}$ и имеющемуся чис-

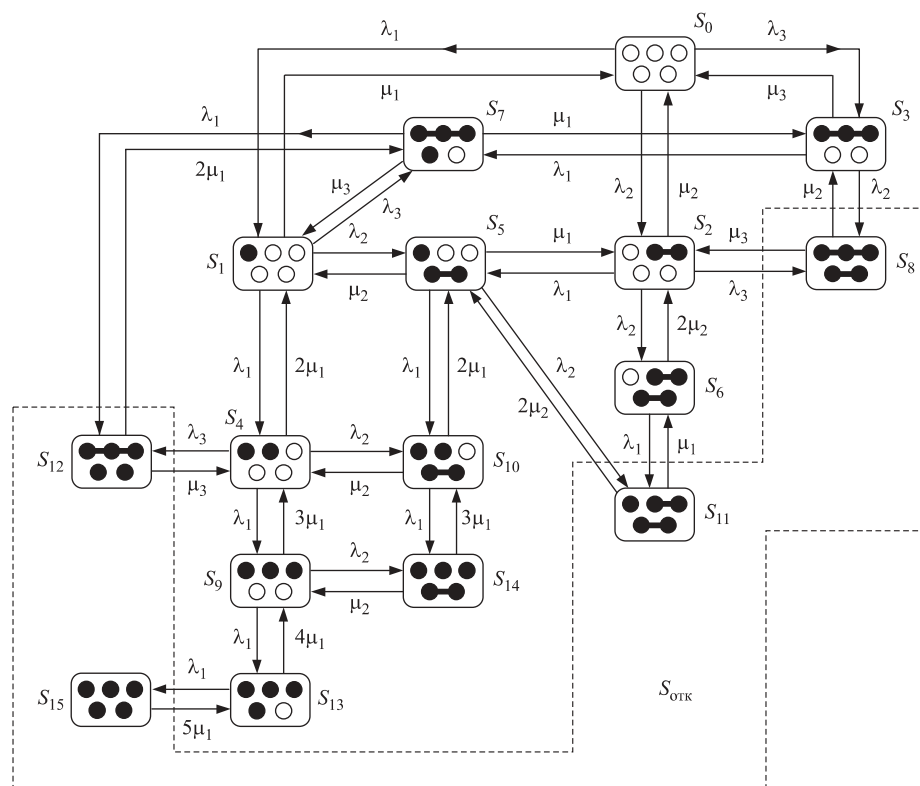


Рис. 9. Граф переходов для пятиканальной системы ($n = 5$), обслуживающей вызовы, требующие задействования либо одного, либо одновременно двух каналов, либо трех каналов (обозначения см. на рис. 1 и 7): $S_{II} = S_{отк} \cup S_6 \cup S_7 \cup S_{10} \cup S_{13}$ — отказ в обслуживании “двойного” вызова; $S_{III} = S_{II} \cup S_3 \cup S_5 \cup S_9$ — отказ в обслуживании “тройного” вызова

лу мобильных подразделений n могут быть найдены вероятности критических состояний $\{p_{отк}, p_{II}, p_{III}\}$ и сделан вывод об эффективности системы в целом [12]. Во втором случае (задача синтеза), например, по заданным требованиям к допустимым значениям вероятностей $\{p_{отк}, p_{II}, p_{III}\}_{доп}$ и известным интенсивностям $\{\lambda\}$ и $\{\mu\}$ может быть определено необходимое число n мобильных подразделений [12].

Таким образом, в данной работе приведены математические модели работы системы ликвидации опасных ситуаций с привлечением мобильных подразделений экстренных служб. В дальнейшем планируется представить результаты численного моделирования применительно к решению задач анализа и синтеза указанной системы с применением конкретных количественных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс М., Брушлинский Н. Н., Вагнер П., Соколов С. В. Обстановка с пожарами в мире в начале XXI века // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 10. — С. 51–58. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.51-58.
2. Brushlinsky N. N., Ahrens M., Sokolov S. V., Wagner P. World Fire Statistics / Center of Fire Statistics of CTIF. — 2015. — Report No. 20. — 63 p.
3. Herweg H., Wagner P. Schnell wie die Feuerwehr // Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes. — November 2013. — Heft 4. — P. 194–204.
4. Таранцев А. А. Методика определения мест дислокации поэтапно создаваемых пожарных частей в сельской местности и корректировки границ районов выезда // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 4. — С. 72–78.
5. Таранцев А. А. О проблеме размещения вновь создаваемых пожарных частей на территориях регионов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 5. — С. 52–57.
6. Алешков М. В., Безбородько М. Д. Применение мобильных средств пожаротушения для защиты объектов атомной энергетики от крупных пожаров в условиях экстремально низких температур // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2014. — № 3. — С. 37–45.
7. Алешков М. В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 5. — С. 59–64.

8. Терехнев В. В., Семенов А. О., Тараканов Д. В. Теоретические основы принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 14–17.
9. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. — Введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
10. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М. : Советское радио, 1972. — 552 с.
11. Алехин Е. М., Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. О распределении Эрланга и некоторых его приложениях // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 6. — С. 11–17.
12. Таранцев А. А. Инженерные методы теории массового обслуживания. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб. : Наука, 2007. — 175 с.

Материал поступил в редакцию 13 июля 2016 г.

Для цитирования: Таранцев А. А., Холостов А. Л., Нодь А. П., Таранцев А. А. Моделирование достаточности мобильных подразделений экстренных служб при возникновении ситуаций повышенной сложности // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 10. — С. 59–66. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.59-66.

English

MODELING OF SUFFICIENCY OF THE MOBILE EMERGENCY UNITS IN CASE OF SITUATIONS OF HIGH COMPLEXITY

TARANTSEV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Organisation of the Fire Suppression and Rescue Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); Head of Laboratory, Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Liniya Vasilyevskogo Ostrova, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail address: t_54@mail.ru)

KHOLOSTOV A. L., Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of Electrical Engineering, Automated Systems and Communication Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: holostov@mail.ru)

NOD A. P., Graduate Student, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: psp.psoor@mail.ru)

TARANTSEV A. A., Lecturer of Fire Tactics and Service Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: dask_cradle@mail.ru)

ABSTRACT

The system of response on the emergency situations is represented here. This article also represents complicated cases when involvement of several types of mobile units is required to react on different emergency situations.

Firemen, rescuers, ambulance or police can be involved as mobile units. Mathematical models which describe the work of this system with involvement of two or three units of different types are developed here. These models allow to define necessary amount of mobile units to liquidate dangerous situations with guaranteed probability and these models also allow to define the estimate of probability of the system conditions “dangerous situations — emergency services units”.

This object is solved by using the mathematical apparatus of exploring the operations and theory of mass service. Solving of this object intends to arrange the list of conditions $\{S\}$ of the explored system. The time average $\{t\}$ of transition from one condition to another is also defined from the analysis of the system. If we set that the quantities $\{t\}$ are accidental and they are subordinated by the exponential laws of arrangements, we can get vectors of intensity of transitions $\{\lambda\}$ and $\{\mu\}$, which are the characteristics of the exponential law of arrangements.

Vector $\{\lambda\}$ determines the frequency of occurrence of dangerous situations. It consists of: λ_1 — frequency of occurrence of situations which demand involving one mobile unit; λ_2 — two mobile units; λ_3 — three mobile units etc. Vector $\{\mu\}$ reflects speeds of liquidation of dangerous situations and it contains quantities: μ_1 — speed of liquidation of situations which demands involving one mobile unit; μ_2 — speed of liquidation of situations which demands involving two mobile units; μ_3 — three mobile units etc.

Diagrams of transition for two or three different types of involving units are shown in this article.

The system of equations in the presumption about stationarity of processes is shown in this article. They are corresponded to the diagrams of transitions and they contain probabilities $\{p\}$ of conditions $\{S\}$. Critical probabilities of refusals are also shown here: $p_{refusal}$ — probability of condition $S_{refusal}$ when all the units are occupied and no mobile units can be sent to emerged dangerous situations.

The possibility of solving the objects of analysis and synthesis of the given system is also shown in this article.

Keywords: danger situations; mobile units; emergency services; system state diagram; possibility of refusal.

REFERENCES

1. Ahrens M., Bruslinskiy N. N., Wagner P., Sokolov S. V. Situation with the fires on the earth at the beginning of the XXI century. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 10, pp. 51–58 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.51-58.
2. Brushlinsky N. N., Ahrens M., Sokolov S. V., Wagner P. *World Fire Statistics. Center of Fire Statistics of CTIF*, 2015, Report No. 20. 63 p.
3. Herweg H., Wagner P. Schnell wie die Feuerwehr. *Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes*, November 2013, heft 4, pp. 194–204.
4. Tarantsev A. A. Technique of definition of places of a dislocation step by step the created firefighters parts in rural areas and corrections of boundaries of areas of departure. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 72–78 (in Russian).
5. Tarantsev A. A. On the problem of placing newly created fire brigades in the territories of the regions. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 5, pp. 52–57 (in Russian).
6. Aleshkov M. V., Bezborodko M. D. application of movable fire extinguishment means for protecting nuclear power plants from large fires under extremely low temperature conditions. *Pozhary i cheyvychnyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya (Fire and Emergencies: Prevention, Elimination)*, 2014, no. 3, pp. 37–45 (in Russian).
7. Aleshkov M. V. Peculiarities of extinguishing large-scale fires on the territory of the Russian Federation under the external effect of hazardous natural phenomena. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 5, pp. 59–64 (in Russian).
8. Terebnev V. V., Semenov A. O., Tarakanov D. V. Decision making theoretical basis of management on fire. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 14–17 (in Russian).
9. Set of rules 11.13130.2009. *The locations of fire departments. The procedure and method of determination*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
10. Ventsel E. S. *Operations research*. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1972. 552 p. (in Russian).
11. Alekhin E. M., Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V. About Erlang's distribution and some its applications. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 11–17 (in Russian).
12. Tarantsev A. A. *Engineering methods of theory of mass service*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007. 175 p. (in Russian).

For citation: Tarantsev A. A., Kholostov A. L., Nod A. P., Tarantsev A. A. Modeling of sufficiency of the mobile emergency units in case of situations of high complexity. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 10, pp. 59–66. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.59-66.