

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. Д. ИЩЕНКО, канд. техн. наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса пожаротушения, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: adinko@mail.ru)

В. В. ПОТАПЕНКО, канд. техн. наук, начальник кафедры пожарной безопасности, Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала А. В. Хрулёва (Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22; e-mail: pww@mail.ru)

УДК 614.84

О ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАЯВОК НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ

Рассмотрены задачи анализа и синтеза систем массового обслуживания (например, систем противопожарной защиты объекта) заявок нескольких типов, требующих привлечения одного, двух или более каналов (например, пожарно-спасательных подразделений). Получены аналитические выражения для вероятностей состояний систем обслуживания. Сформулирована задача анализа как нахождение вероятности отказа системы в приеме заявки какого-либо типа по причине занятости всех каналов, когда известны интенсивности поступления заявок и скорости их обслуживания. Сформулирована задача синтеза как нахождение необходимого числа каналов обслуживания при заданных ограничениях на вероятность отказа в приеме заявок. Показана возможность решения задачи синтеза с использованием номограмм.

Ключевые слова: опасная ситуация; мобильные подразделения; экстренные службы; система массового обслуживания; вероятность отказов.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38

Введение

В работе [1] рассмотрены n -канальные системы массового обслуживания (СМО), предназначенные для работы с заявками различных типов, прием и обслуживание которых требует привлечения либо одного, либо двух или трех каналов обслуживания (КО). Актуальность такой задачи обусловлена наличием автономных объектов [2, 3], на которых могут возникать опасные ситуации (например, пожары) различной сложности, когда для их ликвидации требуется привлечение либо одного пожарно-спасательного подразделения (в терминах СМО — канала обслуживания), либо одновременно двух или трех подразделений при условии, что число таких подразделений n ограничено. Это относится как к промышленным предприятиям и населенным пунктам [4–9], так и к крупным дорожным магистралям и объектам в Арктической зоне [2, 3, 10–12].

В рамках общепринятых допущений теории массового обслуживания [13, 14] при наличии интен-

сивностей поступления заявок 1-го типа λ_1 (для обслуживания которых достаточно привлечь один КО), 2-го типа λ_2 (два КО) и 3-го типа λ_3 (три КО), а также интенсивностей обслуживания заявок соответственно μ_1 , μ_2 и μ_3 в работе [1] получены системы уравнений для вероятностей состояний таких СМО и представлены соответствующие им графы переходов.

На этапах проектирования и функционирования СМО возникают две характерные задачи — анализ и синтез [13–15]. Задача анализа сводится к нахождению состояний СМО $\{p\}$ (прежде всего вероятностей отказа в приеме заявок любого типа $p_{\text{отк}}$, 2-го типа p_{II} и 3-го типа p_{III}) при заданном числе КО n , когда известны интенсивности $\{\lambda\}$ и $\{\mu\}$. Задача синтеза в наиболее распространенном случае заключается в нахождении минимально необходимого числа КО n при известных интенсивностях $\{\lambda\}$ и $\{\mu\}$ и заданных ограничениях на допустимые вероятности отказов $p_{\text{отк}}$, p_{II} и p_{III} . В ряде случаев при

синтезе СМО требуется найти необходимые интенсивности обслуживания $\{\mu\}$ (например, снабдить пожарно-спасательные подразделения специальным оборудованием и увеличить штат подразделений для сокращения времени тушения пожара) при известных значениях $\{\lambda\}$ и n и допустимых вероятностях отказов.

Системы обслуживания заявок двух типов

В работе [1] приведены математические выражения в виде систем уравнений, связывающих вероятности состояний $\{p\}$ СМО с числом КО $n = 2 \dots 7$, куда поступают заявки двух типов с интенсивностями λ_1 и λ_2 , которые обслуживаются в КО со скоростями (интенсивностями) μ_1 и μ_2 соответственно. Авторам удалось получить явные аналитические(!) решения этих систем уравнений через приведенные нагрузки $\alpha_1 = \lambda_1/\mu_1$ и $\alpha_2 = \lambda_2/\mu_2$ (табл. 1), а так-

же общие выражения для вероятностей незанятости всех n КО p_0 и вероятностей отказов $p_{\text{отк}}$ и p_{II} :

$$p_0^{-1} = \sum_{j=0}^{C(n/2)} \frac{\alpha_2^j}{j!} \sum_{i=0}^{n+2j} \frac{\alpha_1^i}{i!}; \quad (1)$$

$$\frac{p_{\text{отк}}}{p_0} = \sum_{j=0}^{C(n/2)} \frac{\alpha_2^j}{j!} \frac{\alpha_1^{n-2j}}{(n-2j)!}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{p_{\text{II}}}{p_0} = & \frac{\alpha_2^{C(n/2)}}{C(n/2)!} \left[n - 2C\left(\frac{n}{2}\right) + \alpha_1^{n-2C(n/2)} \right] + \\ & + \sum_{j=0}^{C(n/2)-1} \frac{\alpha_2^j}{j!} \left[\frac{\alpha_1^{n-j}}{(n-j)!} + \frac{\alpha_1^{n-j-1}}{(n-j-1)!} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где $C(x)$ — функция взятия целого числа от x , например: $C(2) = 2$, $C(2,5) = 2$, $C(3,5) = 3$ и т. д.

Выражения (1)-(3) можно использовать для анализа работы n -канальной СМО данного типа. Для

Таблица 1. Выражения для оценки вероятностей состояний СМО с двумя типами заявок

n	Система уравнений	Аналитическое решение	Номер рисунка в [1]
2	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3;$ $0 = \lambda_2 p_0 - \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_1 - 2\mu_1 p_3$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^2 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2; p_1 = \alpha_1 p_0; p_2 = \alpha_2 p_0;$ $p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0; p_{\text{отк}} = p_2 + p_3 = (\alpha_2 + 0,5\alpha_1^2)p_0;$ $p_{\text{II}} = p_1 + p_3 = (\alpha_1 + \alpha_2 + 0,5\alpha_1^2)p_0$	1
3	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_5;$ $0 = \lambda_2 p_1 - (\mu_1 + \mu_2)p_4 + \lambda_1 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_3 - 3\mu_1 p_5$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^3 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^1 \frac{\alpha_1^i}{i!}; p_1 = \alpha_1 p_0; p_2 = \alpha_2 p_0;$ $p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0; p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_5 = \alpha_1^3 p_0/6;$ $p_{\text{отк}} = p_4 + p_5 = (\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^3/6)p_0;$ $p_{\text{II}} = p_1 + p_2 + p_3 = [\alpha_2(1 + \alpha_1) + 0,5\alpha_1^2 + \alpha_1^3/6]p_0$	2
4	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_1)p_4 + 2\mu_1 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_2 - 2\mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_1 p_3 - (3\mu_1 + \lambda_1)p_6 + 4\mu_1 p_8;$ $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\mu_2 + 2\mu_1)p_7;$ $0 = \lambda_1 p_6 - 4\mu_1 p_8$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^4 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^2 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^2}{2}; p_1 = \alpha_1 p_0; p_2 = \alpha_2 p_0;$ $p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0; p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_5 = 0,5\alpha_2^2 p_0; p_6 = \alpha_1^3 p_0/6;$ $p_7 = 0,5\alpha_1^2 \alpha_2 p_0; p_8 = \alpha_1^4 p_0/24;$ $p_{\text{отк}} = p_5 + p_7 + p_8 = \left(\frac{\alpha_2^2}{2} + \alpha_2 \frac{\alpha_1^2}{2} + \frac{\alpha_1^4}{24} \right) p_0;$ $p_{\text{II}} = p_1 + p_4 + p_6 = \left[\frac{\alpha_2^2}{2} + \alpha_2 \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1^2}{2} \right) + \frac{\alpha_1^3}{6} + \frac{\alpha_1^4}{24} \right] p_0$	3
5	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_4 + 2\mu_1 p_7 + 2\mu_2 p_8;$ $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + 2\mu_2)p_5 + \mu_1 p_8;$ $0 = \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_6 + 4\mu_1 p_9 + \mu_2 p_{10};$ $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \mu_2 + 2\mu_1)p_7 + 3\mu_1 p_{10};$ $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (2\mu_2 + \mu_1)p_8;$ $0 = \lambda_1 p_6 - (4\mu_1 + \lambda_1)p_9 + 5\mu_1 p_{11};$ $0 = \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_7 - (\mu_2 + 3\mu_1)p_{10};$ $0 = \lambda_1 p_9 - 5\mu_1 p_{11}$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^5 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^3 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^2}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{\alpha_1^i}{i!}; p_1 = \alpha_1 p_0;$ $p_2 = \alpha_2 p_0; p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0; p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_5 = 0,5\alpha_2^2 p_0;$ $p_6 = \alpha_1^3 p_0/6; p_7 = 0,5\alpha_1^2 \alpha_2 p_0; p_8 = 0,5\alpha_1 \alpha_2^2 p_0;$ $p_9 = \alpha_1^4 p_0/24; p_{10} = \alpha_1^3 \alpha_2 p_0/6; p_{11} = \alpha_1^5 p_0/120;$ $p_{\text{отк}} = p_8 + p_{10} + p_{11} = \left(\frac{\alpha_2^2}{2} \alpha_1 + \alpha_2 \frac{\alpha_1^3}{6} + \frac{\alpha_1^5}{120} \right) p_0;$ $p_{\text{II}} = p_1 + p_5 + p_7 + p_9 =$ $= \left[\frac{\alpha_2^2}{2} (1 + \alpha_1) + \alpha_2 \left(\frac{\alpha_1^2}{2} + \frac{\alpha_1^3}{62} \right) + \frac{\alpha_1^4}{24} + \frac{\alpha_1^5}{120} \right] p_0$	4

n	Система уравнений	Аналитическое решение	Номер рисунка в [1]
6	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_4 + 2\mu_1 p_7 + 2\mu_2 p_8;$ $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_2)p_5 + \mu_1 p_8 + 3\mu_2 p_9;$ $0 = \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_6 + 4\mu_1 p_{10} + \mu_2 p_{11};$ $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + 2\mu_1)p_7 + 3\mu_1 p_{11} + 2\mu_2 p_{12};$ $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (\lambda_1 + 2\mu_2 + \mu_1)p_8 + 2\mu_1 p_{12};$ $0 = \lambda_2 p_5 - 3\mu_2 p_9;$ $0 = \lambda_1 p_6 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 4\mu_1)p_{10} + 5\mu_1 p_{13} + \mu_2 p_{14};$ $0 = \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_7 - (\lambda_1 + \mu_2 + 3\mu_1)p_{11} + 4\mu_1 p_{14};$ $0 = \lambda_2 p_7 + \lambda_1 p_8 - (2\mu_2 + 2\mu_1)p_{12};$ $0 = \lambda_1 p_{10} - (\lambda_1 + 5\mu_1)p_{13} + 6\mu_1 p_{15};$ $0 = \lambda_2 p_{10} + \lambda_1 p_{11} - (\mu_2 + 4\mu_1)p_{14};$ $0 = \lambda_1 p_{13} - 6\mu_1 p_{15}$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^6 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^4 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^2}{2} \sum_{i=0}^2 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^3}{6}; p_1 = \alpha_1 p_0;$ $p_2 = \alpha_2 p_0; p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0; p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_5 = 0,5\alpha_2^2 p_0;$ $p_6 = \alpha_1^3 p_0/6; p_7 = 0,5\alpha_1^2 \alpha_2 p_0; p_8 = 0,5\alpha_1 \alpha_2^2 p_0;$ $p_9 = \alpha_2^3 p_0/6; p_{10} = \alpha_1^4 p_0/24; p_{11} = \alpha_1^3 \alpha_2 p_0/6;$ $p_{12} = \alpha_1^2 \alpha_2^2 p_0/4; p_{13} = \alpha_1^5 p_0/120;$ $p_{14} = \alpha_1^2 \alpha_2 p_0/24; p_{15} = \alpha_1^6 p_0/6!;$ $p_{отк} = p_9 + p_{12} + p_{14} + p_{15} =$ $= \left(\frac{\alpha_2^3}{6} + \frac{\alpha_2^2}{2} \frac{\alpha_1^2}{2} + \alpha_2 \frac{\alpha_1^4}{24} + \frac{\alpha_1^6}{6!} \right) p_0;$ $p_{II} = p_1 + p_8 + p_{11} + p_{13} = \left[\frac{\alpha_2^3}{6} + \frac{\alpha_2^2}{2} \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1^2}{2} \right) + \right.$ $\left. + \alpha_2 \left(\frac{\alpha_1^3}{6} + \frac{\alpha_1^4}{24} \right) + \frac{\alpha_1^5}{5!} + \frac{\alpha_1^6}{6!} \right] p_0$	5
7	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_4;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + 2\mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_3 + 3\mu_1 p_6 + \mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_4 + 2\mu_1 p_7 + 2\mu_2 p_8;$ $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_2)p_5 + \mu_1 p_8 + 3\mu_2 p_9;$ $0 = \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_6 + 4\mu_1 p_{10} + \mu_2 p_{11};$ $0 = \lambda_2 p_3 + \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + 2\mu_1)p_7 + 3\mu_1 p_{11} + 2\mu_2 p_{12};$ $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (\lambda_1 + 2\mu_2 + \mu_1)p_8 + 2\mu_1 p_{12};$ $0 = \lambda_2 p_5 - (\lambda_1 + 3\mu_2)p_9 + \mu_1 p_{13};$ $0 = \lambda_1 p_6 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 4\mu_1)p_{10} + 5\mu_1 p_{14} + \mu_2 p_{15};$ $0 = \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + 3\mu_1)p_{11} + 4\mu_1 p_{15} + 2\mu_2 p_{16};$ $0 = \lambda_2 p_7 + \lambda_1 p_8 - (\lambda_1 + 2\mu_2 + 2\mu_1)p_{12} + 3\mu_1 p_{16};$ $0 = \lambda_1 p_9 - \mu_1 p_{13};$ $0 = \lambda_1 p_{10} - (\lambda_1 + \lambda_2 + 5\mu_1)p_{14} + 6\mu_1 p_{17} + \mu_2 p_{18};$ $0 = \lambda_2 p_{10} + \lambda_1 p_{11} - (\lambda_1 + \mu_2 + 4\mu_1)p_{15} + 5\mu_1 p_{18};$ $0 = \lambda_2 p_{11} + \lambda_1 p_{12} - (2\mu_2 + 3\mu_1)p_{16};$ $0 = \lambda_1 p_{14} - (\lambda_1 + 6\mu_1)p_{17} + 7\mu_1 p_{19};$ $0 = \lambda_2 p_{14} + \lambda_1 p_{15} - (\mu_2 + 5\mu_1)p_{18};$ $0 = \lambda_1 p_{17} - 7\mu_1 p_{19}$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^7 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^5 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^2}{2} \sum_{i=0}^3 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^3}{6} \sum_{i=0}^1 \frac{\alpha_1^i}{i!};$ $p_1 = \alpha_1 p_0; p_2 = \alpha_2 p_0; p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0; p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0;$ $p_5 = 0,5\alpha_2^2 p_0; p_6 = \alpha_1^3 p_0/6; p_7 = 0,5\alpha_1^2 \alpha_2 p_0;$ $p_8 = 0,5\alpha_1 \alpha_2^2 p_0; p_9 = \alpha_2^3 p_0/6; p_{10} = \alpha_1^4 p_0/24;$ $p_{11} = \alpha_1^3 \alpha_2 p_0/6; p_{12} = \alpha_1^2 \alpha_2^2 p_0/4; p_{13} = \alpha_1 \alpha_2^3 p_0/6;$ $p_{14} = \alpha_1^5 p_0/5!; p_{15} = \alpha_1^4 \alpha_2 p_0/24; p_{16} = \alpha_1^3 \alpha_2^2 p_0/12;$ $p_{17} = \alpha_1^6 p_0/6!; p_{18} = \alpha_1^5 \alpha_2 p_0/5!; p_{19} = \alpha_1^7 p_0/7!;$ $p_{отк} = p_{13} + p_{16} + p_{18} + p_{19} =$ $= \left(\frac{\alpha_2^3}{6} \alpha_1 + \frac{\alpha_2^2}{2} \frac{\alpha_1^3}{6} + \alpha_2 \frac{\alpha_1^5}{120} + \frac{\alpha_1^7}{7!} \right) p_0;$ $p_{II} = p_1 + p_9 + p_{12} + p_{15} + p_{17} = \left[\frac{\alpha_2^3}{6} (1 + \alpha_1) + \right.$ $\left. + \frac{\alpha_2^2}{2} \left(\frac{\alpha_1^2}{2} + \frac{\alpha_1^3}{6} \right) + \alpha_2 \left(\frac{\alpha_1^4}{24} + \frac{\alpha_1^5}{5!} \right) + \frac{\alpha_1^6}{6!} + \frac{\alpha_1^7}{7!} \right] p_0$	6

решения задачи синтеза целесообразно построить номограммы с линиями равных значений n в координатах (α_1, α_2) . Это, в свою очередь, требует получения зависимостей $\alpha_2 = f(\alpha_1, n)$, которые в ходе исследований были найдены в виде полиномов:

$$\sum_{k=0}^{C(n/2)} A_k \alpha_2^k = 0, \quad (4)$$

где $\{A\}$ — коэффициенты, зависящие от приведенной нагрузки α_1 , числа КО n и вероятностей отказа в приеме заявки.

В табл. 2 приведены выражения для величин $\{A\}$ и порядка определения приведенной нагрузки α_2 .

Моделирование, проведенное с использованием выражений табл. 2, позволило построить номограммы для $p_{отк} = 0,1\%$ и $p_{II} = 0,5\%$ (рис. 1), которые можно использовать для решения задач синтеза СМО. Следует обратить внимание на то, что для нечетных значений n приведенная нагрузка α_2 может возрастать при увеличении α_1 . Это объясняется тем, что при большом относительном числе “двойных заявок” всегда может оставаться свободным хотя бы один КО (одно подразделение).

Пример 1. Известно, что для объекта приведенная нагрузка по заявкам, требующим привлечения одного КО, $\alpha_1 = 0,1$, двух КО — $\alpha_2 = 0,04$. Требуется

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (4) для нахождения приведенной нагрузки α_1

n	$\{A\}$	Отказ в обслуживании вызова		Порядок нахождения α_2
		любого с вероятностью $p_{\text{отк}}$	двойного с вероятностью p_{II}	
2; 3	a_1	$\alpha_1^{n-2} - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-2}$	$\Sigma_{n-2}(1 - p_{\text{II}})$	$\alpha_2 = -a_0/a_1$
	a_0	$\alpha_1^n/n! - p_{\text{отк}} \Sigma_n$	$\Sigma_n(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-2}$	
4; 5	a_2	$(\alpha_1^{n-4} - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-4})/2$	$\Sigma_{n-4}(1 - p_{\text{II}})/2$	$\alpha_2 = \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2} - a_1}{2a_2}$
	a_1	$\alpha_1^{n-2}/(n-2)! - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-2}$	$\Sigma_{n-2}(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-4}$	
	a_0	$\alpha_1^n/n! - p_{\text{отк}} \Sigma_n$	$\Sigma_n(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-2}$	
6; 7	a_3	$(\alpha_1^{n-6} - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-6})/6$	$\Sigma_{n-6}(1 - p_{\text{II}})/6$	Численное решение кубического уравнения с нахождением приемлемого корня α_2
	a_2	$[\alpha_1^{n-4}/(n-4)! - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-4}]/2$	$[\Sigma_{n-4}(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-6}]/2$	
	a_1	$\alpha_1^{n-2}/(n-2)! - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-2}$	$\Sigma_{n-2}(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-4}$	
	a_0	$\alpha_1^n/n! - p_{\text{отк}} \Sigma_n$	$\Sigma_n(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-2}$	
n	a_j	$\frac{\alpha_1^{n-2j}}{(n-2j)!} - p_{\text{отк}} \Sigma_{n-2j}$	$\frac{\Sigma_{n-2j}(1 - p_{\text{II}}) - \Sigma_{n-2(j+1)}}{j!}$	Общие выражения, $j = 0, \dots, \lfloor n/2 \rfloor$

Примечание. $\Sigma_{m>0} = \sum_{i=0}^{m>0} \frac{\alpha_i}{i!}$; $\Sigma_0 = 1$; $\Sigma_{m<0} = 0$.

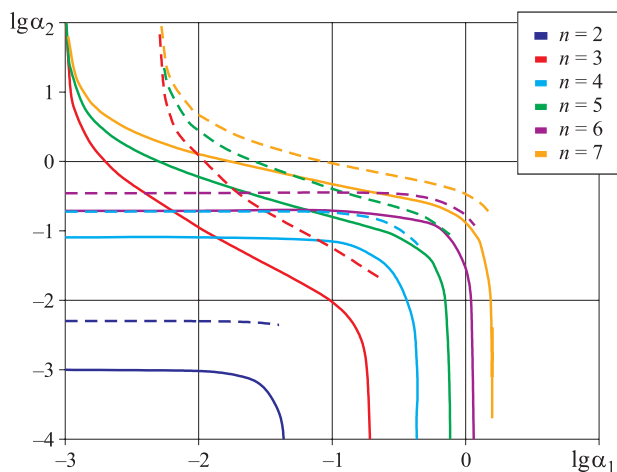


Рис. 1. Зависимость $\alpha_2 = f(\alpha_1)$ при различных значениях n :
 — — — $p_{\text{откл.доп}} = 0,001$; - - - $p_{\text{откл.доп}} = 0,005$

решить задачу синтеза — найти минимально необходимое число КО n , чтобы вероятность отказа в приеме и обслуживании любой заявки $p_{\text{отк}}$, а также вероятность отказа в приеме и обслуживании заявки, требующей привлечения сразу двух КО p_{II} , не превышала 0,001 (или 0,1 %).

Учитывая, что $\lg \alpha_1 = -1$, $\lg \alpha_2 = -1,398$, и воспользовавшись номограммами на рис. 1 и 2, находим, что условиям $p_{\text{отк}} \leq 0,1 \%$ и $p_{\text{п}} \leq 0,1 \%$ удовлетворяет только пятиканальная ($n = 5$) СМО. При этом условию $p_{\text{отк}} \leq 0,1 \%$ удовлетворяла бы и четырехканальная СМО.

Пример 2. Требуется решить задачу анализа — найти вероятности отказов в обслуживании $p_{\text{отк}}$ и $p_{\text{п}}$

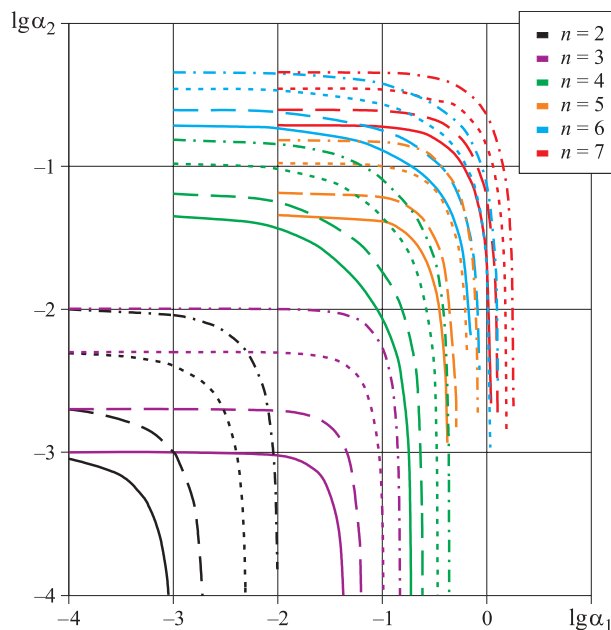


Рис. 2. Зависимость $\alpha_2 = f(\alpha_1)$ при обслуживании заявок, требующих привлечения двух каналов обслуживания, при различных значениях n и $p_{\text{отк. доп.}}$ равном 0,001 (—); 0,002 (— — —); 0,005 (----); 0,010 (- · -)

при $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,04$ и различном числе КО n и проверить тем самым правильность решения задачи синтеза, рассмотренной в примере 1.

С использованием аналитических выражений, приведенных в табл. 1, становится возможным рассчитать вероятности $\{p_{\text{отк}}, p_{\text{п}}, p_0\} = f(\alpha_1 = 0,1; \alpha_2 = 0,04; n)$ (табл. 3). Как следует из полученных значений вероятностей, действительно, условия

Таблица 3. Вероятности состояний $p_{отк}$, p_{II} и p_0 при раз-
личном числе КО

Пока- затель	Значение показателя, %, при n					
	2	3	4	5	6	7
$p_{отк}$	3,930	0,363	0,087	0,008	Около 0	Около 0
p_{II}	12,664	4,278	0,450	0,095	0,001	0,001
p_0	87,336	87,020	86,944	86,937	86,936	86,936

$p_{отк} \leq 0,1\%$ и $p_{II} \leq 0,1\%$ выполняются при $n = 5$. При этом вероятность того, что на объекте не будет возникать ситуаций, требующих привлечения пожарно-спасательных подразделений (т. е. все КО незаняты), достаточно высока — более 86 %.

Системы обслуживания заявок трех типов

В работе [1] приведены также математические выражения в виде систем уравнений, связывающих

вероятности состояний $\{p\}$ СМО с числом КО $n = 3 \dots 5$, куда поступают заявки трех типов с интенсивностями λ_1, λ_2 и λ_3 , которые обслуживаются в КО со скоростями (интенсивностями) μ_1, μ_2 и μ_3 соответственно.

В табл. 4 приведены уравнения, соответствующие графам переходов на рис. 7–9 [1] и явные аналитические решения для оценки вероятностей состояний $\{p\}$ данной СМО. Данные выражения также могут использоваться для решения задач анализа и синтеза.

Как и ранее, задача анализа решается нахождением вероятностей состояний СМО $\{p\}$ при известных значениях приведенных нагрузок $\alpha_i = \lambda_i / \mu_i$ ($i = 1, \dots, 3$) и числе КО n . При этом наиболее важным результатом является нахождение вероятностей отказов $p_{отк}$, p_{II} и p_{III} . Задача синтеза может решаться также путем нахождения минимально необходимого числа КО n при известных приведенных

Таблица 4. Выражения для оценки вероятностей состояний СМО с тремя типами заявок

n	Система уравнений	Аналитические решения	Номер рисунка в [1]
3	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_5;$ $0 = \lambda_3 p_0 - \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + 2\mu_1)p_4 + 3\mu_1 p_6;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_2 + \mu_1)p_5;$ $0 = \lambda_1 p_4 - 3\mu_1 p_6$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^3 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^1 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_3; p_1 = \alpha_1 p_0;$ $p_2 = \alpha_2 p_0; p_3 = \alpha_3 p_0; p_4 = 0,5\alpha_1^2 p_0;$ $p_5 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_6 = p_0 \alpha_1^3 / 6; p_{отк} = p_3 + p_5 + p_6;$ $p_{II} = p_{отк} + p_2 + p_4; p_{III} = p_{II} + p_1$	7
4	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5 + \mu_3 p_6;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_5 + 2\mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_3 p_0 - (\lambda_1 + \mu_3)p_3 + \mu_1 p_6;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu_1)p_4 + 3\mu_1 p_8 + \mu_2 p_9;$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_1)p_5 + 2\mu_1 p_9;$ $0 = \lambda_3 p_1 + \lambda_1 p_3 - (\mu_3 + \mu_1)p_6;$ $0 = \lambda_2 p_2 - 2\mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + 3\mu_1)p_8 + 4\mu_1 p_{10};$ $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (2\mu_1 + \mu_2)p_9;$ $0 = \lambda_1 p_8 - 4\mu_1 p_{10}$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^4 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^2 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^2}{2} + \alpha_3 \sum_{i=0}^1 \frac{\alpha_1^i}{i!};$ $p_1 = \alpha_1 p_0; p_2 = \alpha_2 p_0; p_3 = \alpha_3 p_0; p_4 = 0,5\alpha_1^2 p_0;$ $p_5 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_6 = \alpha_1 \alpha_3 p_0; p_7 = 0,5\alpha_2^2 p_0;$ $p_8 = p_0 \alpha_1^3 / 6; p_9 = 0,5\alpha_1^2 \alpha_2 p_0;$ $p_{10} = p_0 \alpha_1^4 / 24; p_{отк} = p_6 + p_7 + p_9 + p_{10};$ $p_{II} = p_{отк} + p_3 + p_5 + p_8; p_{III} = p_{II} + p_2 + p_4$	8
5	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5 + \mu_3 p_7;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_5 + 2\mu_2 p_6 + \mu_3 p_8;$ $0 = \lambda_3 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)p_3 + \mu_1 p_7 + \mu_2 p_8;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\mu_1)p_4 + 3\mu_1 p_9 + \mu_2 p_{10} + \mu_3 p_{12};$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)p_5 + 2\mu_1 p_{10} + 2\mu_2 p_{11};$ $0 = \lambda_2 p_2 - (\lambda_1 + 2\mu_2)p_6 + \mu_1 p_{11};$ $0 = \lambda_3 p_1 + \lambda_1 p_3 - (\lambda_1 + \mu_3 + \mu_1)p_7 + 2\mu_1 p_{12};$ $0 = \lambda_3 p_2 + \lambda_2 p_3 - (\mu_3 + \mu_2)p_8;$ $0 = \lambda_1 p_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 3\mu_1)p_9 + 4\mu_1 p_{13} + \mu_2 p_{14};$ $0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (\lambda_1 + \mu_2 + 2\mu_1)p_{10} + 3\mu_1 p_{14};$ $0 = \lambda_2 p_5 + \lambda_1 p_6 - (2\mu_2 + \mu_1)p_{11};$ $0 = \lambda_3 p_4 + \lambda_1 p_7 - (\mu_3 + 2\mu_1)p_{12};$ $0 = \lambda_1 p_9 - (\lambda_1 + 4\mu_1)p_{13} + 5\mu_1 p_{15};$ $0 = \lambda_2 p_9 + \lambda_1 p_{10} - (\mu_2 + 3\mu_1)p_{14};$ $0 = \lambda_1 p_{13} - 5\mu_1 p_{15}$	$p_0^{-1} = \sum_{i=0}^5 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \sum_{i=0}^3 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \frac{\alpha_2^2}{2} \sum_{i=0}^1 \frac{\alpha_1^i}{i!} +$ $+ \alpha_3 \sum_{i=0}^2 \frac{\alpha_1^i}{i!} + \alpha_2 \alpha_3; p_1 = \alpha_1 p_0;$ $p_2 = \alpha_2 p_0; p_3 = \alpha_3 p_0; p_4 = 0,5\alpha_1^2 p_0;$ $p_5 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; p_6 = 0,5\alpha_2^2 p_0; p_7 = \alpha_1 \alpha_3 p_0;$ $p_8 = \alpha_2 \alpha_3 p_0; p_9 = p_0 \alpha_1^3 / 6; p_{10} = 0,5\alpha_1^2 \alpha_2 p_0;$ $p_{11} = 0,5\alpha_1 \alpha_2^2 p_0; p_{12} = 0,5\alpha_1^2 \alpha_3 p_0;$ $p_{13} = p_0 \alpha_1^4 / 24; p_{14} = p_0 \alpha_1^3 \alpha_2 / 6;$ $p_{15} = p_0 \alpha_1^5 / 120;$ $p_{отк} = p_8 + p_{11} + p_{12} + p_{14} + p_{15};$ $p_{II} = p_{отк} + p_6 + p_7 + p_{10} + p_{13};$ $p_{III} = p_{II} + p_3 + p_5 + p_9$	9

Таблица 5. Вероятности состояний $p_{отк}$, p_{II} , p_{III} и p_0 при различном числе КО

Показатель	Значение показателя при n		
	3	4	5
$p_{отк}$	0,0097	0,0015	0,00035
p_{II}	0,0486	0,0111	0,00182
p_{III}	0,1351	0,0500	0,01146
p_0	0,8649	0,8637	0,86350

нагрузках α_1 , α_2 , α_3 и заданных требованиях к вероятностям отказов $p_{отк}$, p_{II} и p_{III} . В отличие от случая СМО с двумя типами заявок, рассмотренного в предыдущем разделе, когда применялись номограммы (см. рис. 1 и 2), задача синтеза СМО с тремя типами заявок может решаться путем подбора необходимого числа КО n .

Пример 3. Известно, что для объекта приведенная нагрузка по заявкам, требующим привлечения одного КО, $\alpha_1 = 0,1$, одновременно двух КО —

$\alpha_2 = 0,04$, одновременно трех КО — $\alpha_3 = 0,007$. Требуется решить задачу анализа — найти вероятности отказов $p_{отк}$, p_{II} и p_{III} в приеме заявок соответствующих типов при различном числе КО n .

С использованием аналитических выражений, приведенных в табл. 4, становится возможным рассчитать вероятности $\{p_{отк}, p_{II}, p_{III}, p_0\} = f(\alpha_1 = 0,1; \alpha_2 = 0,04; \alpha_3 = 0,007; n)$ (табл. 5).

Выводы

Таким образом, получены аналитические выражения и номограммы для решения задач анализа и синтеза СМО с разнотипными заявками, требующими использования либо одного канала обслуживания, либо одного или одновременно двух каналов, либо одного, двух или трех каналов обслуживания. Решение указанных задач является важным применительно к автономным объектам, на которых могут возникать различного рода опасные ситуации, требующие привлечения, в частности, пожарно-спасательных подразделений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Иценко А. Д. Комплексная готовность персонала аварийно-спасательных формирований в условиях севера // Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктике, включая вопросы подготовки профильных кадров для работы в северных условиях : материалы международной конференции. — СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2014. — С. 86–98.
3. Алешиков 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.
4. 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.
5. 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.
6. Brushlinsky N. N., Ahrens M., Sokolov S. V., Wagner P. World of Fire Statistics / Center of Fire Statistics of CTIF. — 2015. — No. 20. — 63 p.
7. Harald Herweg, Peter Wagner. Schnell wie die Feuerwehr // VFDB (Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes). — November 2013. — Heft 4. — P. 194–204.
8. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. — Введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
9. Скопцов А. А. Организация управления оперативными подразделениями МЧС при тушении пожаров : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2004. — 22 с.
10. Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Fomin V. M. Designing machinery for the Arctic: A problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2015. — Vol. 85, No. 1 — P. 79–86. DOI: 10.1134/s1019331615010104.
11. Абдурагимов Г. И. Теоретические основы совершенствования управления оперативными службами мегаполисов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2000. — 33 с.
12. Алешиков М. В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 5. — С. 59–64.

13. *Вентцель Е. С.* Исследование операций. — М. : Советское радио, 1972. — 552 с.
14. *Таранцев А. А.* Инженерные методы теории массового обслуживания. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб. : Наука, 2007. — 175 с.
15. *Таранцев А. А.* О способе выбора параметров систем массового обслуживания с очередью // Автоматика и телемеханика. — 1999. — Т. 60, № 7. — С. 172–176.

Материал поступил в редакцию 11 января 2017 г.

Для цитирования: *Таранцев А. А., Холостов А. Л., Ищенко А. Д., Потапенко В. В.* О задачах анализа и синтеза систем обслуживания заявок нескольких типов // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 3. — С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.

English

PROBLEMS OF ANALYSIS AND SYNTHESIS OF APPLICATION SERVICE SYSTEMS OF SEVERAL TYPES

TARANTSEV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Organisation of 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 of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Line VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: t_54@mail.ru)

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

ISHCHENKO A. D., Candidate of Technical Sciences, Head of Fire Fighting Science and Training Centre Fire Fighting Service, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: adinko@mail.ru)

POTAPENKO V. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Fire Safety Department, Military Academy of Logistics Support named after General A. V. Hrulev (Zakharyevskaya St., 22, Saint Petersburg, 191123, Russian Federation; e-mail: pww@mail.ru)

ABSTRACT

The problems of analysis and synthesis of the response system to emergency situations in difficult cases are shown here. The response system is considered as a queuing system of applications of several types requiring the use of one, two or more channels (for example mobile fire-rescue units, ambulance brigades, police and medical care). The relevance of this problem is caused by the presence of autonomous objects in an environment where the number of mobile emergency response units of the system is limited.

The analysis problem is formulated as finding the probability of system failure in the reception of applications (of the 1st type p_I , the 2nd type p_{II} and 3rd type p_{III}) for a given number of service channels n , when the intensities $\{\lambda\}$ and $\{\mu\}$ are known, which are the parameters of exponential distribution laws. The synthesis problem is formulated as finding the required number of service channels n under certain intensities $\{\lambda\}$ and $\{\mu\}$ and set limits on allowable probability of failure p_I – p_{III} .

Analytical expressions for the probabilities of system states through the given loads are obtained for the two types of applications of the service system $\alpha_1 = \lambda_1/\mu_1$ and $\alpha_2 = \lambda_2/\mu_2$, presented in table form. The general expressions for the probability of unoccupied n channels are also obtained — p_0 and failure probability — p_I and p_{II} , which can be used for analysis of n -channel queuing system of this type. The nomogram with lines of equal values of n in the coordinates is encouraged to use to solve the problem of synthesis of these systems (α_1, α_2). For this purpose the dependences $\alpha_2 = f(\alpha_1, n)$ are obtained, and they are found in the form of polynomials, whose coefficients depend on the given

load α_1 , the number of service channels n and the probability of failure in the admission of an application. Formula to determine these coefficients and to determine the given load α_2 is obtained. It was found that the two types of applications service system for odd values of n at least one service channel may always remain free.

Analytical solutions for the evaluation of the probability of states of this queuing system are obtained for the application service system of three types.

The examples show the possibility of solving problems of analysis and synthesis of queuing systems with heterogeneous applications using nomograms. This study is a logical continuation of the previously published article "Modeling of sufficiency of the mobile emergency units in case of situations of high complexity.

Keywords: danger situations; mobile units; emergency services; queuing system; probability of failure.

REFERENCES

1. 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. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 10, pp. 59–66 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.59-66.
2. Ishchenko A. D. Integrated preparedness of SAR personnel for operations in the northern areas. In: *Proceedings of International Conference "Challenges in Emergency Preparedness and Response in the Arctic. Staffing Issues"*. Saint Petersburg, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2014, pp. 86–98 (in Russian).
3. 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 chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya (Fire and Emergencies: Prevention, Elimination)*, 2014, no. 3, pp. 37–45 (in Russian).
4. Terebnev V. V., Semenov A. O., Tarakanov D. V. Decision making theoretical basis of management of fire. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 14–17 (in Russian).
5. Ahrens M., Brushlinskiy N. N., Wagner P., Sokolov S. V. Situations with the fires on the earth at the beginning of the XXI century. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 10, pp. 51–58 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.51-58.
6. Brushlinsky N. N., Ahrens M., Sokolov S. V., Wagner P. *World Fire Statistics. Center of Fire Statistics of CTIF*, 2015, no. 20. 63 p.
7. Harald Herweg, Peter Wagner. Schnell wie die Feuerwehr. *VFDB (Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes)*, November 2013, heft 4, pp. 194–204.
8. *Set of rules 11.13130.2009. Location of fire service divisions. Procedure and methods of determination*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
9. Skoptsov A. A. *Organization management operational units Emergency Situations Ministry in fire-fighting. Abstr. cand. tech. sci. diss.* Saint Petersburg, 2004. 22 p. (in Russian).
10. Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Fomin V. M. Designing machinery for the Arctic: A problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 1, pp. 79–86. DOI: 10.1134/s1019331615010104.
11. Abduragimov G. I. *Theoretical bases of perfection of management of the operational services of megacities. Abstr. dr. tech. sci. diss.* Moscow, 2000. 33 p. (in Russian).
12. Aleshkov M. V. Peculiarities of extinguishing large-scale fires on the territory on the Russian Federation under the external effect of hazardous natural phenomena. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 5, pp. 59–64 (in Russian).
13. Ventsel E. S. *Operations research*. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1972. 552 p. (in Russian).
14. Tarantsev A. A. *Engineering methods of theory of mass service*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007. 175 p. (in Russian).
15. Tarantsev A. A. On a method for choosing the service parameters in queuing systems. *Avtomatika i telemekhanika (Automation and Remote Control)*, 1999, vol. 60, no. 7. pp. 172–176 (in Russian).

For citation: Tarantsev A. A., Kholostov A. L., Ishchenko A. D., Potapenko V. V. Problems of analysis and synthesis of application service systems of several types. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.