Математическая модель процесса применения космической системы при прогнозировании развития региональной чрезвычайной ситуации природного характера

Mathematical model of the applying space system process forecasting the development of regional emergency situations of natural character

Привалов / Privalov A.
Андрей Андреевич
(aprivalov@inbox.ru)
доктор военных наук, профессор,
действительный член Российской академии естественных наук и Российской академии военных наук.
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС) Императора Александра I»,
профессор кафедры «Электрическая связь».
г. Санкт-Петербург

Колесов / Kolesov V.
Вадим Александрович
(vka@mail.ru)
кандидат военных наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ,
профессор кафедры.
г. Санкт-Петербург

Скуднева / Skudneva E.
Екатерина Валентиновна
(skykatty@gmail.com)
ПГУПС,
ассистент кафедры «Электрическая связь».
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: математическая модель – mathematical model; космическая система – space system; стохастическая сеть – stochastic network; эквивалентная функция – equivalent function; чрезвычайная ситуация – emergency situation.

В статье предложена модель процесса подготовки космических систем различного назначения к применению в интересах обеспечения функционирования информационной системы субъекта РФ при угрозе возникновения ЧС регионального характера. Модель основана на использовании метода топологического преобразования стохастической сети.
На основе разработанной математической модели получены количественные оценки длительности интервала подготовки КС к применению при угрозе развития ЧС природного характера.

The paper is dedicated to a model of the process space systems` preparation for various applications for use in the interests of functioning of the information system of the Russian Federation subject under the threat of a regional disaster. The model is based on the method of graphical evaluation and review technique.
On the basis of the developed mathematical model, quantitative estimates of the duration of the preparation interval of the COP for use in the event of a threat of development of a natural emergency are obtained.

Введение

Для современного состояния России и других промышленно развитых стран мира характерно нарастание угроз в природно-техногенной сфере, а техногенные и природные катастрофы становятся постоянно действующими факторами не только экономики, но и политики. Крупнейшие аварии, катастрофы и стихийные бедствия, имевшие место в последние десятилетия в России и за рубежом, унесли сотни тысяч человеческих жизней, причинили большой и часто невосполнимый ущерб окружающей среде. Прямые экономические потери и затраты на ликвидацию их последствий достигают десятков и сотен миллиардов долларов.

В соответствии с федеральным законом “О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера” под чрезвычайной ситуацией (ЧС) природного и техногенного характера понимается обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей

2 2018.indd 133 04.07.2018 14:26:02

или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушения условий жизнедеятельности людей [6,7].

Наносимый чрезвычайными ситуациями вред выражается через последствия природного и техногенного бедствия, являющегося источником чрезвычайной ситуации.

ЧС регионального характера – те ЧС, в результате которых зона ЧС не выходит за пределы одного субъекта РФ, при этом количество пострадавших составляет свыше 50 человек, но не более 500 человек либо, размер материального ущерба составляет свыше 5 млн рублей, но не более 500 млн рублей [7].

По природе возникновения ЧС можно разделить на техногенные, природные, экологические, антропогенные, социальные и комбинированные.

К природным относятся ЧС, связанные с проявлением стихийных сил природы: землетрясения, цунами, наводнения, извержения вулканов, оползни, сели, ураганы, смерчи, бури, природные пожары и др.

Чрезвычайные ситуации характеризуются качественными и количественными критериями. К качественным критериям относятся: временной (внезапность и быстрота развития событий); социально-экологический (человеческие жертвы, выведение из хозяйственного оборота больших площадей); социально-психологический.

В настоящее время появились большие возможности для прогноза и предупреждения стихийных бедствий и природных катастроф. Эти возможности обеспечиваются появлением новых информационных технологий, развитием глобальных компьютерных сетей и телекоммуникаций, совершенствование системы государственного управления. Используя перечисленные средства, возможно более эффективно, чем раньше, прогнозировать и предупреждать стихийные бедствия и ликвидировать их последствия.

Существующая тенденция к возрастанию масштабов ЧС заставляет своевременно и обоснованно вырабатывать необходимые меры для предупреждения ЧС природного характера и их ликвидации. С этой целью создаются соответствующие структуры – системы информационного обеспечения в условиях ЧС.

Анализ развития чрезвычайных ситуаций и принятие оперативных решений затрудняются сложностью оценки их основных факторов и эффективности принимаемых решений. Руководящим органам обычно приходится действовать в условиях острого дефицита времени, ограниченной точности и достоверности информации. Так, точность среднесрочных метеопрогнозов составляет 65–70%. Это может привести к принятию нерациональных и даже ошибочных решений, а следовательно и к большим потерям. Поэтому совершенствование систем информационного обеспечения, ориентированных на прогноз и предупреждение ЧС, на защиту населения и территорий, имеет особенно большое значение.

Обсуждаемый ниже подход поможет формализовать и автоматизировать процессы принятия решений в условиях ЧС. Он поможет выбирать способы реализации принимаемых решений и оценивать их эффективность. Все математические модели возникновения бедствий и катастроф, алгоритмы прогноза и анализа полученных данных дадут положительный результат только в том случае, когда они будут использованы в системе информационного обеспечения.

Для разработки модели процесса применения космической системы при прогнозировании развития региональной чрезвычайной ситуации природного характера воспользуемся методом топологического преобразования стохастических сетей, описанным в [8].

Достоинством метода является возможность представления процессов с различной степенью глубины детализации набором вложенных моделей. Это, с одной стороны, позволяет более точно получать исходные данные для моделей более высокого уровня, а с другой – останавливаться (сосредотачиваться) на необходимом уровне детализации. Кроме того, метод отличается ясным физическим смыслом при постановке задачи, а также высокой степенью формализации остальных этапов, что позволяет контролировать адекватность модели физическому процессу на всех этапах ее реализации.

В целях преобразования исходных данных для представления их в качестве сети использована принятая стандартная классификация терминов при задействовании космических систем.

Постановка задачи. Пусть согласно данным поступившего среднесрочного метеорологического прогноза примерно через семь суток прогнозируется развитие региональной чрезвычайной ситуации природного характера, которое может повлиять на функционирование информационно-телекоммуникационной системы региона[9]. КС является составной частью информационно-телекоммуникационной системы региона и выполняет задачи по своему предназначению в интересах различных структур и ведомств, в том числе для мониторинга чрезвычайных ситуаций различного характера. Для минимизации возможного ущерба, который может быть нанесен информационно-телекоммуникационной системе региона, и обеспечения ее устойчивого функционирования необходимо задействовать космические системы различного назначения.

Особенностями применения космических систем при подготовке их к задействованию в случае угрозы возникновения ЧС являются [1–7]:

1. Перечень задач, решаемых в настоящее время космической системой с учетом времени, региона, выполнения поставленных задач, мест нахождения приемо-передающих комплексов.

2. Временем, необходимым для принятия управленческих решений и разработки документов, на уровне от руководства страны до подразделения управления космическими аппаратами.

2 2018.indd 134 04.07.2018 14:26:02

Таблица 1

Перечень мероприятий, проводимых при подготовке к задействованию космической системы

№, п/п	Наименование мероприятия	Средняя длительность реализации мероприятия	Обозначение функции времени реализации и функции распределения
1.	Подготовка и проведение заседания правительства по возможной чрезвычайной ситуации.	145–183,9 ч. (6–8 суток)	$\overline{t}_A$, $\overline{t}_B$, $\overline{t}_C$, $A(t), B(t), C(t)$
2.	Подготовка документов в министерствах и ведомствах (МЧС, Министерство связи).	8–12 ч.	$\overline{t}_D$, $\overline{t}_E$, $\overline{t}_F$, $D(t), E(t), F(t)$
3.	Подготовка документов в ПАО «Газпром» для «Газпром Космические Системы», ФГУП «Космическая связь», Роскосмос.	2–4 ч.	$\overline{t}_G, \overline{t}_H, \overline{t}_I$, $G(t), H(t), I(t)$
4.	Передача распоряжений в ЦУП на разработку программ управления Космическими аппаратами Ресурс-П.	2–3 ч.	$\overline{t}_J$, $J(t)$
5.	Передача распоряжений в ЦУП на разработку программ управления Космическими аппаратами Канопус-В.	1 ч.	$\overline{t}_K$, $K(t)$
6.	Разработка программ для КА Ресурс-П, Канопус-В в баллистическом и специальном информационном центре.	1–2 ч.	$\overline{t}_N, \overline{t}_O$, $N(t), O(t)$
7.	Передача разработанных программ из ЦУП в НАКУ орбитальными средствами.	0,5 ч.	$\overline{t}_R$, $R(t)$
8.	Вход КА Ресурс-П и Канопус-В в зону видимости НАКУ.	2,5–4 ч.	$\overline{t}_T, \overline{t}_U$, $T(t), U(t)$
9.	Закладка рабочей программы на борт КА Ресурс-П и Канопус-В.	0,1 ч.	$\overline{t}_X, \overline{t}_W$, $X(t), W(t)$
10.	Доклад о закладке программы из НАКУ в ЦУП.	1 ч.	$\overline{t}_\Gamma$, $\Gamma(t)$
11.	Доклад о закладке программы из ЦУП в Роскосмос.	1 ч.	$\overline{t}_\Theta$, $\Theta(t)$
12.	Подготовка мобильного пункта приема информации (МППИ).	0,5 ч.	$\overline{t}_\Pi$, $\Pi(t)$
13.	Выход МППИ в назначенный район.	0,5 ч.	$\overline{t}_\Sigma$, $\Sigma(t)$
14.	Развертывание МППИ и проверка каналов приема информации.	2 ч.	$\overline{t}_\chi$, $\chi(t)$
15.	Доклад начальнику регионального управления МЧС о готовности к работе МППИ.	0,5 ч.	$\overline{t}_\psi$, $\psi(t)$

2 2018.indd 135 04.07.2018 14:26:03

16.	Доклад начальника регионального управления МЧС министру МЧС.	0,5 ч.	$\overline{t}_{\Omega}$, $\Omega(t)$
17.	Доклад министра МЧС председателю Правительства.	0,5 ч.	$\overline{t}_{E}$, $E(t)$
18.	Согласование применения КА «Метеор-3» между МЧС и Росгидрометом.	2–3 ч.	$\overline{t}_{L}$, $L(t)$
19.	Разработка рабочей программы для КА «Метеор-3» в баллистическом и специальном информационном центре.	1–2 ч.	$\overline{t}_{P}$, $P(t)$
20.	Передача разработанной программы в НАКУ орбитальными средствами.	0,5 ч.	$\overline{t}_{S}$, $S(t)$
21.	Вход КА в зону видимости НАКУ.	2,5–4 ч.	$\overline{t}_{V}$, $V(t)$
22.	Закладка рабочей программы на борт КА.	1 ч.	$\overline{t}_{Y}$, $Y(t)$
23.	Коммутация каналов передачи информации.	1 ч.	$\overline{t}_{\Delta}$, $\Delta(t)$
24.	Проверка каналов передачи информации	1 ч.	$\overline{t}_{\Lambda}$, $\Lambda(t)$
25.	Доклад в ГУ ЧС о готовности информационной телекоммуникационной системы.	0,5 ч.	$\overline{t}_{\Phi}$, $\Phi(t)$
26.	Доклад министра МЧС председателю Правительства РФ.	0,5 ч.	$\overline{t}_{\rho}$, $\rho(t)$
27.	Заключение контракта на предоставление услуг связи между МЧС и оператором спутниковой связи «Inmarsat», (Лондон).	2–3 ч.	$\overline{t}_{M}$, $M(t)$
28.	Перевод денежных средств на счета оператора спутниковой связи «Inmarsat», (Лондон).	1–2 ч.	$\overline{t}_{Q}$, $Q(t)$
29.	Коммутация каналов оператора спутниковой связи «Inmarsat», (Лондон).	0,5 ч.	$\overline{t}_{Z}$, $Z(t)$
30.	Проверка каналов оператора спутниковой связи «Inmarsat», (Лондон) в интересах МЧС.	1 ч.	$\overline{t}_{\Xi}$, $\Xi(t)$

3. Учет степени загруженности подразделений управления космическими аппаратами и решаемыми задачами.

4. Состояние целевой аппаратуры и других систем космических аппаратов.

5. Параметрами орбит космических аппаратов и расположением комплексов управления космическими аппаратами.

Подготовка к задействованию космической системы в случае угрозы возникновения ЧС предусматривает, как правило, проведение мероприятий, перечисленных в таблице 1; а их последовательность показана на рис. 1.

Последовательность проведения мероприятий при подготовке к задействованию космической системы представлена на рис. 1.

Требуется определить функцию распределения времени успешной подготовки космической системы к использованию в ЧС.

Решение. Стохастическая сеть, отображающая последовательность событий по подготовке КС к задействованию в случае угрозы возникновения ЧС представлена на рис. 2.

Данная стохастическая сеть является достаточно сложной. Поэтому с целью определения эквивалентной функции стохастической сети будем полагать, что

2 2018.indd 136 04.07.2018 14:26:04

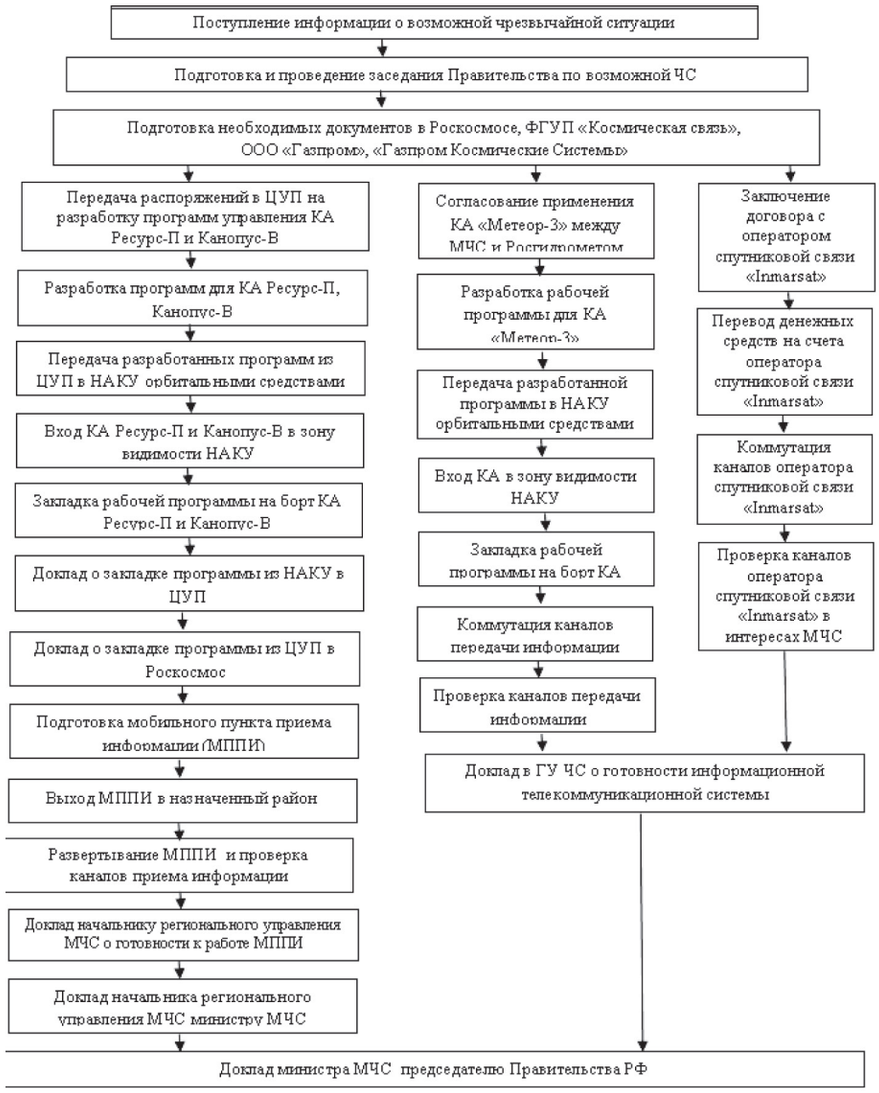


Рис. 1. Последовательность проведения мероприятий при подготовке к задействованию космической системы

законы распределения времени свершения соответствующих вервям событий относятся к классу экспоненциальных и произведем ее последовательное укрупнение с введением новых параметров [8]. Результатом первичного укрупнения является стохастическая сеть, представленная на рис 3.

На рисунке 3 обозначено:

$$a_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[A(t)\right]=\frac{a_1}{a_1+s};$$

$$b_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[B(t)\right]=\frac{b_1}{b_1+s};$$

$$c_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[C(t)\right]=\frac{c_1}{c_1+s};$$

$$d_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[D(t)\right]=\frac{d_1}{d_1+s};$$

$$f_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[F(t)\right]=\frac{f_1}{f_1+s};$$

$$g_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[G(t)\right]=\frac{g_1}{g_1+s};$$

$$k_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[K(t)\right]=\frac{k_1}{k_1+s};$$

$$m_1(s)=\int_0^\infty e^{-st}\cdot d\left[M(t)\right]=\frac{m_1}{m_1+s}:$$

Преобразования Лапласа функций распределения времени реализации композиционных частных процессов, имеющих следующие параметры распределений:

$$a1:=\left(A+D+G\right)^{-1};$$
$$b1:=\left(B+E+H+L+P+S+V+Y+\Delta+\Lambda+\Phi\right)^{-1};$$

2 2018.indd 137 04.07.2018 14:26:04

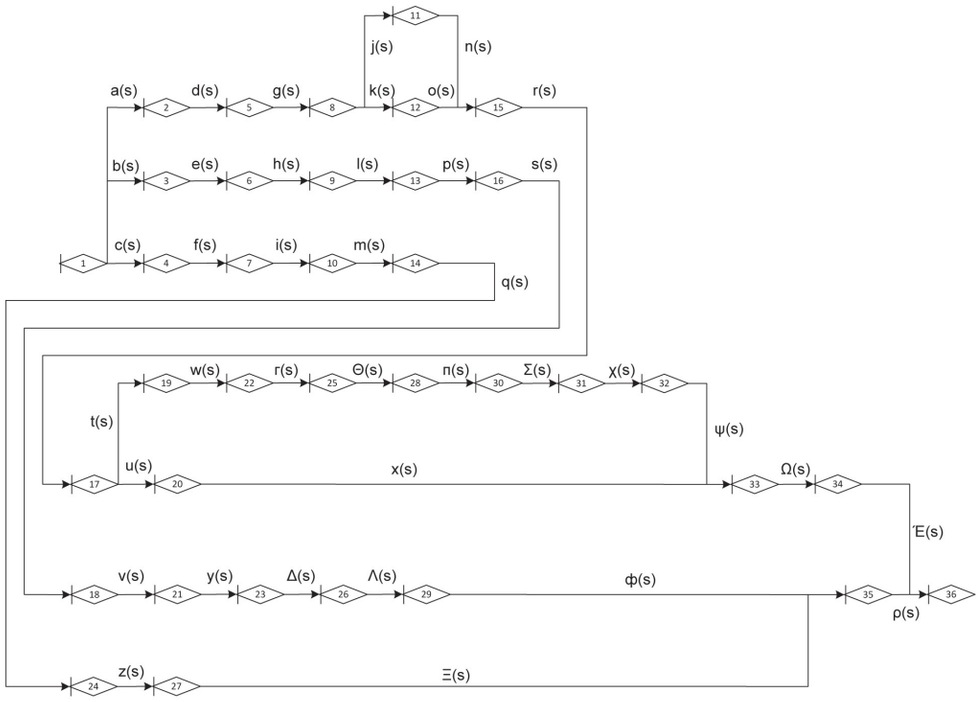


Рис. 2. Исходная стохастическая сеть, отображающая последовательность событий по подготовке КС к задействованию в случае угрозы возникновения ЧС

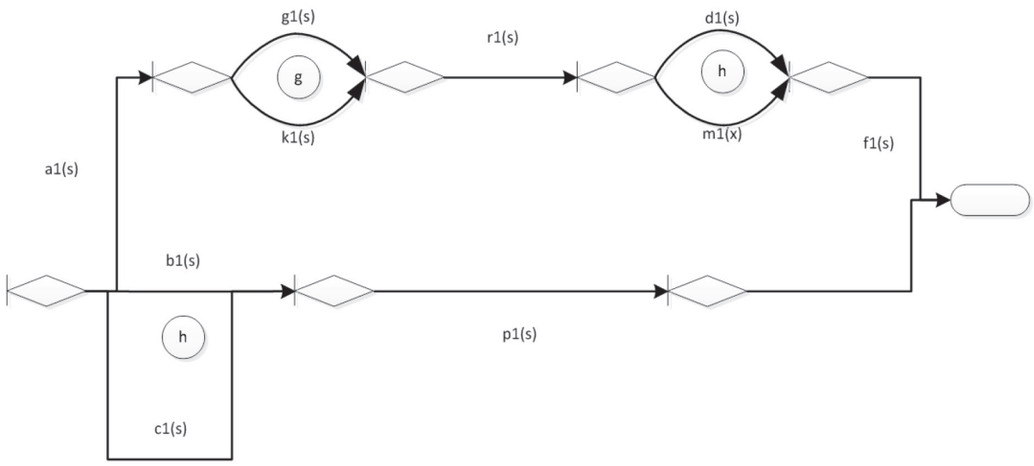


Рис. 3. Результат первичного укрупнения стохастической сети

2 2018.indd 138 04.07.2018 14:26:05

$$c1 := (C + F + I + M + Q + Z + \Xi)^{-1};$$

$$d1 := (W + T + \Gamma + \Theta + \Pi + \Sigma + X + \Psi)^{-1};$$

$$f1 := (\Omega + E)^{-1}; \quad k1 := (\mathrm{K} + \mathrm{O})^{-1};$$

$$g1 := (J + N)^{-1}; \quad m1 := (U + X)^{-1};$$

$$A = \frac{1}{t_a};\ D = \frac{1}{t_d};\ G = \frac{1}{t_g};\ B = \frac{1}{t_b};\ E = \frac{1}{t_e};$$

$$H = \frac{1}{t_h};\ L = \frac{1}{t_l};\ P = \frac{1}{t_p};\ S = \frac{1}{t_s};$$

$$V = \frac{1}{t_v};\ Y = \frac{1}{t_y};\ \Delta = \frac{1}{t_\Delta};\ \Lambda = \frac{1}{t_\Lambda};\ \Phi = \frac{1}{t_\Phi}.$$

На втором этапе укрупнения стохастическую сеть (рис. 3) получим сеть, показанную на рис.4.

На рис. 4 обозначены:

$$q_1(s) = \int_0^\infty e^{-st} \cdot d\left[Q(t)\right] = \frac{q_1}{q_1 + s};$$

$$h_1(s) = \int_0^\infty e^{-st} \cdot d\left[H(t)\right] = \frac{h_1}{h_1 + s};$$

$$n_1(s) = \int_0^\infty e^{-st} \cdot d\left[N(t)\right] = \frac{n_1}{n_1 + s}:-$$

преобразование Лапласа функций распределения времени реализации композиционных частных процессов, имеющих следующие параметры распределений:

$$q1 := \frac{g^2 + g \cdot k + k^2}{g \cdot k \cdot (g + k)};\ n1 := \frac{d^2 + d \cdot m + m^2}{d \cdot m \cdot (d + m)};$$

$$h1 := \frac{b^2 + b \cdot c + c^2}{b \cdot c \cdot (b + c)}.$$

Окончательный вид укрупненной стохастической сети представлен на рис.4, на котором ветви характеризуются параметрами:

$$\alpha_1 := \left(a^{-1} + q^{-1} + R^{-1} + n^{-1} + f^{-1}\right)^{-1};$$

$$\beta_1 := \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{P}\right)^{-1},$$

где:

$$\alpha_1(s) = \int_0^\infty e^{-st} \cdot d\left[\alpha(t)\right];\ \beta_1(s) = \int_0^\infty e^{-st} \cdot d\left[\beta(t)\right].$$

Таким образом, эквивалентная функция стохастической сети (рис. 2) может быть определена по формуле:

$$\xi(s) := \frac{\alpha \cdot \beta \cdot (2 \cdot s + \alpha \cdot \beta)}{(s + \alpha)(s + \beta)(s + \alpha + \beta)}$$

Используя разложение Хевисайда для случая простых полюсов с последующим интегрированием полученного результата с переменным верхним пределом, определим искомую функцию распределения:

$$R11(t) := \sum_{i=1}^{3} \beta \cdot \frac{\alpha}{-s_i} \cdot$$

$$\cdot \frac{(2 \cdot s_1 + \alpha + \beta)\left(1 - \exp(s_i \cdot t)\right)}{3 \cdot (s_i)^2 + 2 \cdot s_i (2 \cdot \beta + 2 \cdot \alpha) + \left[\beta \cdot (\alpha + \beta) + (2 \cdot \beta + \alpha) \cdot \alpha\right]}$$

где

$$s_1 := -\alpha;\ \ s_2 := -\beta;\ \ s_3 := -(\alpha + \beta).$$

При этом среднее время подготовки космической системы к задействованию в ЧС равно:

$$\mathrm{TT} := \sum_{i=1}^{3} \beta \cdot \frac{\alpha}{(-s_i)^2} \cdot$$

$$\cdot \frac{(2 \cdot s_1 + \alpha + \beta)}{3 \cdot (s_i)^2 + 2 \cdot s_i (2 \cdot \beta + 2 \cdot \alpha) + \left[\beta \cdot (\alpha + \beta) + (2 \cdot \beta + \alpha) \cdot \alpha\right]}$$

Результаты моделирования

Проведены расчеты процесса задействования КС и оценки уровня ее готовности к определенному времени с момента получения прогноза о возмож-

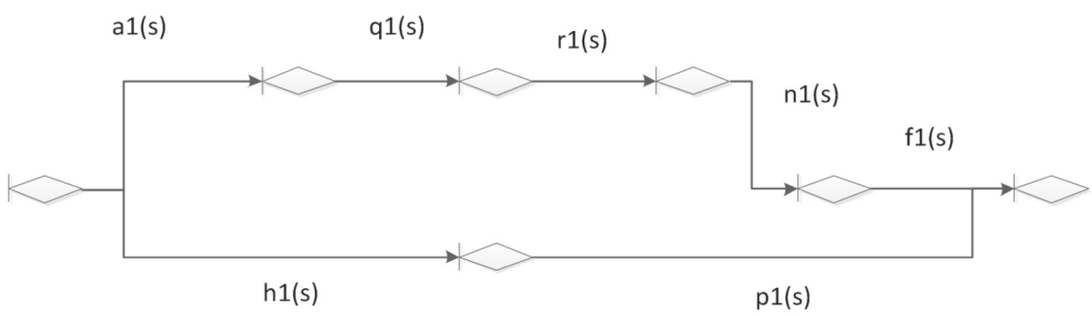


Рис. 4. Результат вторичного укрупнения стохастической сети

2 2018.indd 139 04.07.2018 14:26:06

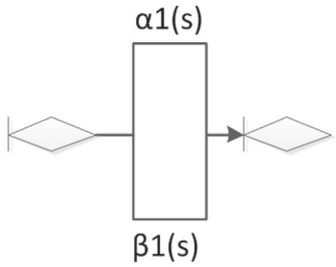
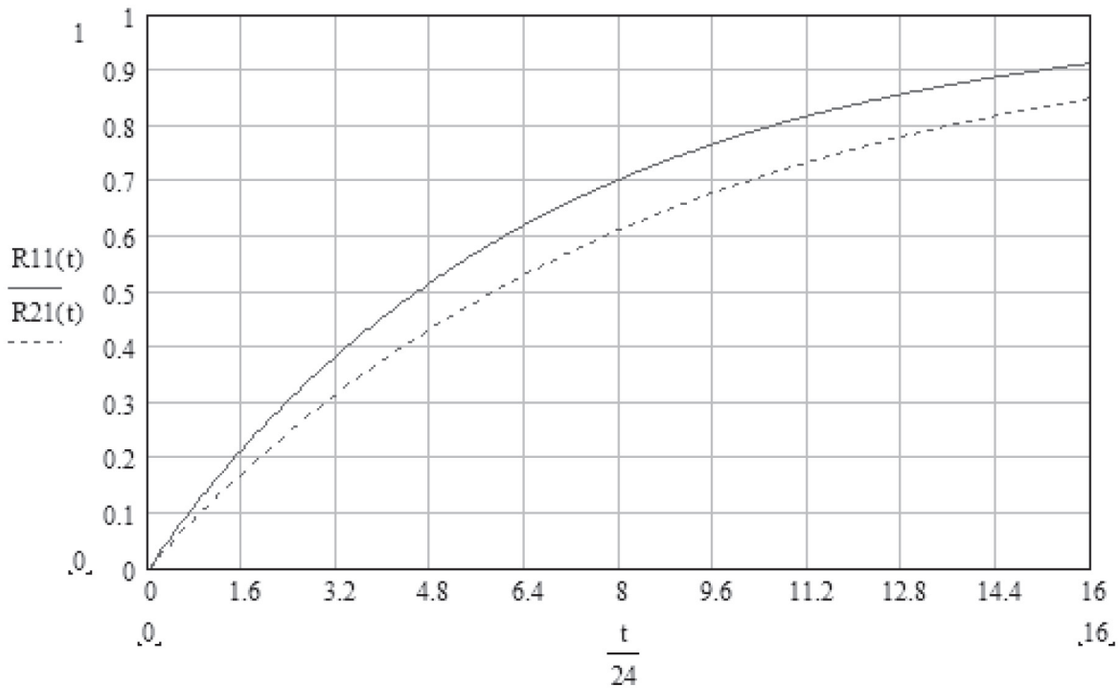


Рис. 5. Результат окончательного преобразования стохастической сети



TT = 158.403 часов среднее время свершения сложного события при минимальных значениях исх. данных

$\frac{TT}{24} = 6.6$ суток

TT2 = 203.144 часов среднее время свершения сложного события при максимальных значениях исх. данных

$\frac{TT2}{24} = 8.464$ суток

Рис. 6. Результаты моделирования возможности задействования КС и оценки уровня ее готовности на определенном временном интервале от момента получения прогноза на возможность развития региональной чрезвычайной ситуации природного характера

2 2018.indd 140 04.07.2018 14:26:07

ности развития региональной чрезвычайной ситуации природного характера, результаты которых представлены в виде графиков на рис. 6. При проведении расчетов полагалось, что среднее время подготовки космической системы к задействованию при минимальных значениях исходных данных составляет 158,403 часа или 6,6 суток, а среднее время совершения сложного события при максимальных значениях исходных данных составляет 203,144 часа или 8,464 суток. Эти временные величины были получены на основе исходных данных промежуточного моделирования, анализа ведомственной принадлежности и особенностей применения космических систем при угрозе возникновения и в ходе ликвидации последствий стихийных бедствий.

Анализ результатов

Анализ полученных в ходе моделирования показал, что разработанная модель является работоспособной, чувствительной к изменению используемых исходных данных, адекватно отображает события задействования КС различного назначения и позволяет определить вероятностно-временные характеристики моделируемого события.

Для сокращения времени на подготовку к задействованию КС в условиях возможного развития региональной ЧС природного характера необходимо сократить временной интервал принятия решений от момента получения прогноза на развитие ЧС до начала непосредственной подготовки к задействованию КС; для исключения времени ожидания входа КА в зону радиовидимости КИК необходимо задействовать КА-ретрансляторы.

Полученные в ходе моделирования значения среднего времени подготовки к задействованию КС позволяют проводить оценку влияния различных элементов сети на возможность задействования КС и качественно оценить уровень ее готовности на определенном временном интервале от момента получения прогноза на возможность развития региональной чрезвычайной ситуации природного характера, которое может повлиять на функционирование информационно-телекоммуникационной системы региона.

Литература

1. Михайлов, В. Ф. Космические системы связи / В.Ф. Михайлов, В.Н. Мошкин, И.В. Брагин. – СПб.: ГУАП, 2006 – 74 с.

2. Бессонов, А. А. Спутниковые навигационные системы / А.А. Бессонов, В.Я. Мамаев. – СПб.: ГУАП, 2006 – 36 с.

3. Верба, В. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. Верба, Н. Неронский, И. Осипов. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

4. Воробьева, А. А. Дистанционное зондирование Земли / А.А. Воробьева. – СПб.: ИТМО, 2012. – 168 с.

5. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения М.: Стандартинформ, 2011. – 24 с.

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 мая 2003 г. №304 "О классификации предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера". – М., 2003 – 11 с.

7. Постановление Правительства Российской Федерации от 5 ноября 1995 г. №1113 "О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций". – М., 1995– 12 с.

8. Привалов, А. А. Метод ТПСС и его использование для анализа систем связи ВМФ – А.А. Привалов. – СПб, ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 2001. – 168 с.

9. Руководящий документ РД52.27.724–2009 «Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения». – М., 2009. – 61 с.

10. Федеральный закон Российской Федерации «Об информации, информационных технологиях и о защите информации». – М., 2006 – 16 с.

2 2018.indd 141 04.07.2018 14:26:07