

УДК 519.21

**С. А. Сергеев****МНОГОКАНАЛЬНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ  
УДАЛЁННОГО СЕРВЕРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
МОНИТОРИНГА ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Дата поступления: 18.01.2016

Решение о публикации: 17.03.2016

**Цель:** Определить возможность реализации всех операций, связанных с технологическим циклом обработки, поступающих от датчиков автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений. **Методы:** Задача решена путём построения имитационной и аналитической нестационарных моделей автоматизированной системы мониторинга и моделирования. Для построения матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений использован рекурсивный метод. **Результаты:** Достоверность расчётов подтверждена путём их взаимного сравнения. Результаты моделирования показали, что система значительно превосходит предъявленные к ней требования к оперативности обработки поступающих заявок. Впервые была реализована многоканальная нестационарная аналитическая модель. **Практическая значимость:** Методика определения возможности реализации всех операций, связанных с технологическим циклом обработки данных, поступающих от датчиков автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений, может применяться и для других высоконагруженных систем. Предложенный рекурсивный алгоритм генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания, значительно упрощает составление этой матрицы для многопараметрических нестационарных аналитических моделей.

Нестационарная модель, автоматизированная система мониторинга, искусственные сооружения, вероятности состояний системы.

**Sergey A. Sergeyev**, post-graduate student, assistant lecturer, serega\_svetl@mail.ru (Petersburg State Transport University) MULTIPLE-LINE NON-STATIONARY MODEL OF A REMOTE SERVER FOR AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES

**Objective:** To determine possibility of realisation of all operations related to technological cycle of processing data coming from detectors of an automated system for monitoring of engineering structures' technical condition. **Methods:** The problem is solved through building simulation and analytical non-stationary models of automated system for monitoring and simulation. Recursive method was deployed for building a coefficient matrix for homogeneous differential equations system. **Results:** Dependability of calculations is confirmed by reciprocal comparison. Simulation results indicated that the system significantly exceeds demands placed on it, as regards promptness of processing incoming requests. For the first time, a multiple-line non-stationary analytical model was realised. **Practical importance:** The method for determining possibility of realisation of all operations related to the technological cycle of processing data coming from detectors of an automated system for monitoring of engineering structures' technical condition can also be applied to other highly loaded systems. The proposed recursive algorithm for generating a coefficient matrix for a homogeneous differential equations system which describes a non-stationary service system significantly simplifies compiling this matrix for multi-parameter non-stationary analytical models.

Non-stationary model, automated monitoring system, engineering structures, system state probabilities.

Для своевременного реагирования на опасные изменения параметров искусственных сооружений необходимо мониторить их геодезическое состояние. Проблема мониторинга искусственных сооружений рассмотрена в [1, 2, 7–10]. Однако в этих источниках рассматривались вопросы архитектуры автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений (АСМИС) и использование данных от датчиков. Настоящая работа посвящена определению возможности реализовать все операции, связанные с технологическим циклом обработки данных, поступающих от датчиков, за отведённый интервал времени. При перегрузке либо отказе работы компонентов АСМИС возникает вероятность несвоевременного получения информации о нежелательном состоянии искусственного сооружения, что может привести к значительным материальным потерям и даже к человеческим жертвам.

### Исследование удалённого сервера системы АСМИС

В [2] описана АСМИС «АСМАДС». Система состоит из двух серверов: локального и удалённого. Ранее была разработана нестационарная модель локального сервера, проведены его аналитическое и имитационное моделирование, а также нагрузочное тестирование, которое подтвердило результаты моделирования.

Для получения полной картины возможности реализации всех операций, связанных с технологическим циклом удалённого сервера, также разработаны имитационная и аналитическая модели, каждая из которых характеризуется следующими параметрами:

- 1)  $M$  – количество типов заявок;
- 2)  $KT_i (i = \overline{1, M})$  – количество заявок  $i$ -го типа, поступающих в нестационарную систему обслуживания (НСО) за интервал моделирования;
- 3)  $\lambda_{ij}$  – элемент матрицы интенсивности поступления заявки  $i$ -го типа с номером  $j$ ;

- 4)  $L$  – число каналов обслуживания;
- 5)  $\mu_{ij} (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, L})$  – элемент матрицы интенсивности обслуживания каналом с номером  $j$  заявки  $i$ -го типа;
- 6)  $\varphi_{ij} (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, L})$  – элемент матрицы доступности каналов.  $\varphi_{ij} = 1$ , если заявке типа  $i$  доступен канал с номером  $j$ ,  $\varphi_{ij} = 0$  – в противном случае;
- 7)  $\vec{n} = \{n_i\} (i = \overline{1, M})$  – вектор, определяющий количество заявок  $i$ -го типа, находящихся в НСО;
- 8)  $\vec{m} = \{m_i\} (i = \overline{1, M})$  – вектор, определяющий количество заявок каждого типа, уже получивших обслуживание и покинувших НСО;
- 9)  $\vec{l} = \{l_j\} (j = \overline{1, L})$  – вектор состояний каналов обслуживания,  $l_j = 0$ , если  $j$ -й канал свободен,  $l_j = i$ , если  $j$ -й канал обслуживает заявку типа  $i$ ;
- 10)  $\vec{Q}$  – вектор очереди, причём  $i$ -я компонента вектора равна номеру типа заявки, стоящей на  $i$ -м месте в очереди на обслуживание. При этом если заявка, стоящая первой в очереди, не имеет доступа к только что освободившемуся каналу обслуживания, последний занимает заявка, стоящая ближе всего к началу очереди, имеющая доступ к этому каналу;
- 11)  $\vec{pr} = \{pr_i\}, i = \overline{1, M}$  –  $i$ -я компонента вектора, которая определяет приоритет заявок  $i$ -го типа.

Состояние НСО в каждый момент времени характеризуется упорядоченным набором векторов:  $(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})$ . Составим систему однородных дифференциальных уравнений Чепмена – Колмогорова в векторно-матричном виде:

$$dP_{(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})}(t) = A \cdot P_{(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})}(t), \quad (1)$$

где  $P_{(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})}(t)$  – вектор вероятностей нахождения НСО в одном из состояний в момент времени  $t$ ;  $A$  – квадратная матрица. Задав затем начальные условия  $P_{(\vec{0}, \vec{0}, \vec{0}, \vec{0})}(0) = 1$ , где вероятности остальных состояний равны 0, можно решить соответствующую задачу Коши.

Исходя из требований к развёртыванию описанной системы, она должна решать сле-

дующую задачу. По условиям задачи на удалённом сервере возникло состояние, которое требует запустить прогнозирующий анализ данных, поступающих от 15 датчиков с интенсивностью  $10c^{-1}$ . Кроме того, с интенсивностью  $2c^{-1}$  поступают три запроса от пользователей системы через графический интерфейс на углублённый прогнозирующий анализ. Процессор удалённого сервера имеет 4 ядра обслуживания. Каждое ядро обрабатывает заявку прогнозирующего типа с интенсивностью  $0,2743c^{-1}$ , а заявку типа углублённого прогноза – с интенсивностью  $0,2071c^{-1}$ . Распределение времени поступления и обработки заявок подчинено экспоненциальному закону. Необходимо найти момент времени  $t_1$ , в котором все 18 заявок будут обработаны с вероятностью не менее 90%, а также момент времени  $t_2$ , в котором заявки на углублённый анализ, поступившие от пользователей, будут обработаны с вероятностью не менее 90%. Если  $t_1 > 60$  или  $t_2 > 30$ , необходимо разработать стратегии ускорения работы удалённого сервера. В постановке условий задачи введено допущение. Интенсивность обработки заявок обоих типов была получена из статистики обработки этих заявок на одном ядре. Предполагается, что при запуске обработки одновременно четырёх заявок на отдельном ядре каждая интенсивность их обработки останется прежней, так как затраты процессорного времени удалённого сервера на обработку других запросов, а также операций операци-

онной системы ничтожно малы по сравнению с заявками на прогнозирование.

Для определения значений  $t_1$  и  $t_2$  были использованы программы для имитационного и аналитического моделирования НСО [3, 5, 6]. Так как вывод общего уравнения для системы дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания, модель которой дана выше, – трудновыполнимая задача, решено составлять матрицу коэффициентов для аналитической модели с помощью метода, предложенного в [4].

Переходы между состояниями системы происходят по следующим правилам:

1) из состояния  $P_{\bar{n}, \bar{m}, \bar{l}, \bar{Q}}$ , в котором  $n_i + m_i < KT_i$ , система может перейти в состояние  $P_{\bar{n}_1, \bar{m}_1, \bar{l}_1, \bar{Q}_1}$  с интенсивностью  $\lambda_{i, n_i + m_i + 1}$ . Если  $l_j = 0$ , то  $l_j = i$ , вектор  $\mathbf{q}$  остаётся без изменений.  $n_1 = n_i + 1$ . Вектор  $\bar{m}$  остаётся без изменений;

2) из состояния  $P_{\bar{n}, \bar{m}, \bar{l}, \bar{Q}}$ , в котором  $l_i > 0$ , система может перейти в состояние  $P_{\bar{n}_1, \bar{m}_1, \bar{l}_1, \bar{Q}_1}$  с интенсивностью  $\mu_{i, i}$ , где  $n_1 = n_i - 1$ ,  $m_1 = m_i + 1$ ,  $l_i = \bar{Q}_1$ , при этом необходимо удалить  $Q_1$ .

Кроме того, в алгоритме используется функция проверки наличия состояния isExist, задача этой функции – проверять все полученные состояния на дубликаты. Блок-схема алгоритма генерации матрицы состояний для многоканальной модели приведена на рис. 1.

Исходные данные моделей:

1.  $M = 2$ .

2.  $\overline{KT} = \{15, 3\}$ .

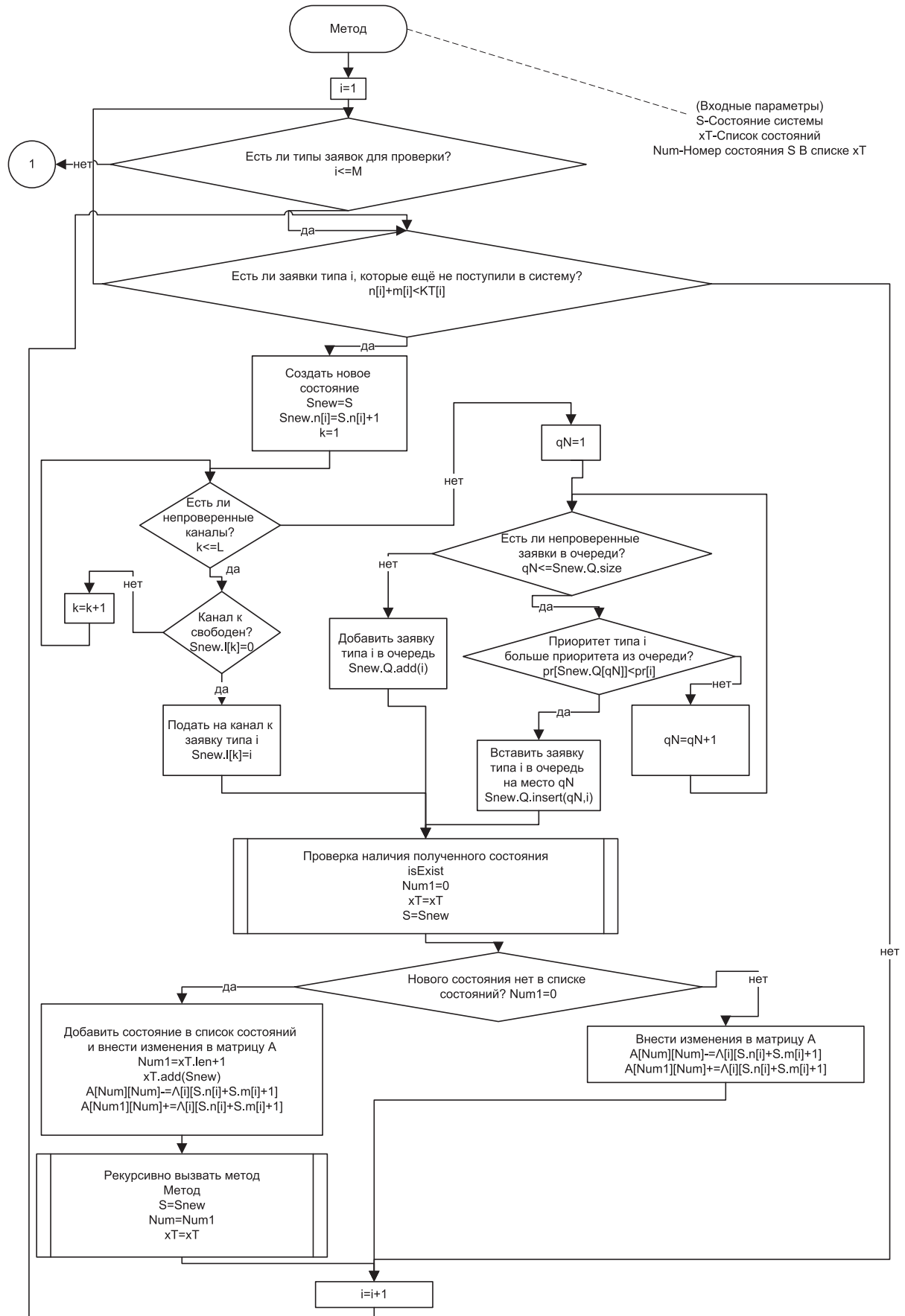
3.  $\lambda_{ij} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ .

4.  $L = 4$ .

5.  $\mu_{ij} = \begin{bmatrix} 0,2743 & 0,2743 & 0,2743 & 0,2743 \\ 0,2071 & 0,2071 & 0,2071 & 0,2071 \end{bmatrix}$ .

6.  $\Phi_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ .

7.  $\overline{pr} = \{1, 2\}$ .



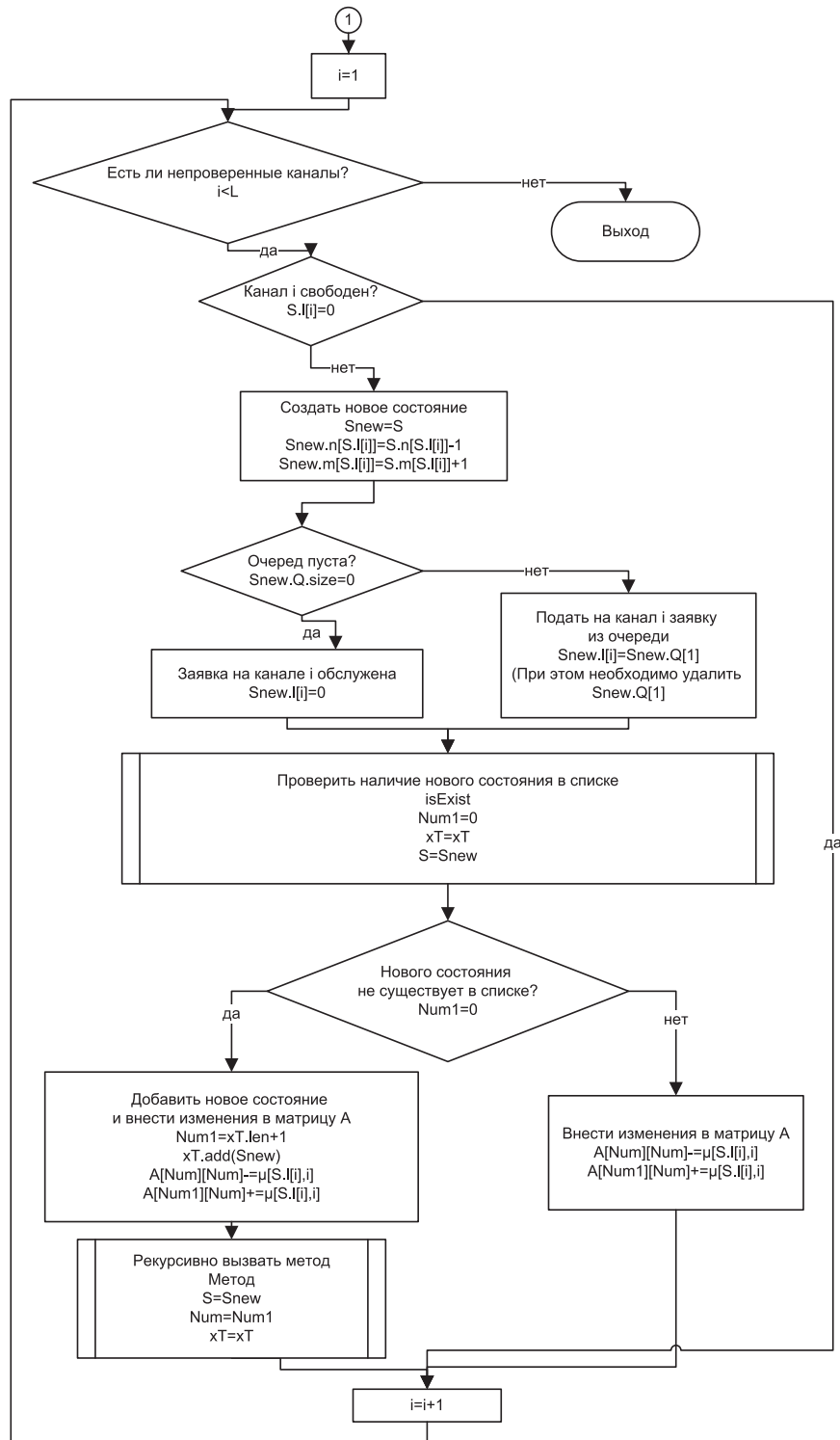


Рис. 1. Блок-схема алгоритма генерации матрицы состояний для многоканальной модели

Для определения  $t_1$  построены графики зависимости вероятности нахождения системы в состоянии, где  $\vec{m} = \{15, 3\}$ , с помощью аналитической и имитационной моделей. Раз-

ница в значениях вероятностей, полученных с помощью обеих моделей, была только в 4-м знаке после запятой. На рис. 2 приведён график вероятности нахождения системы в по-

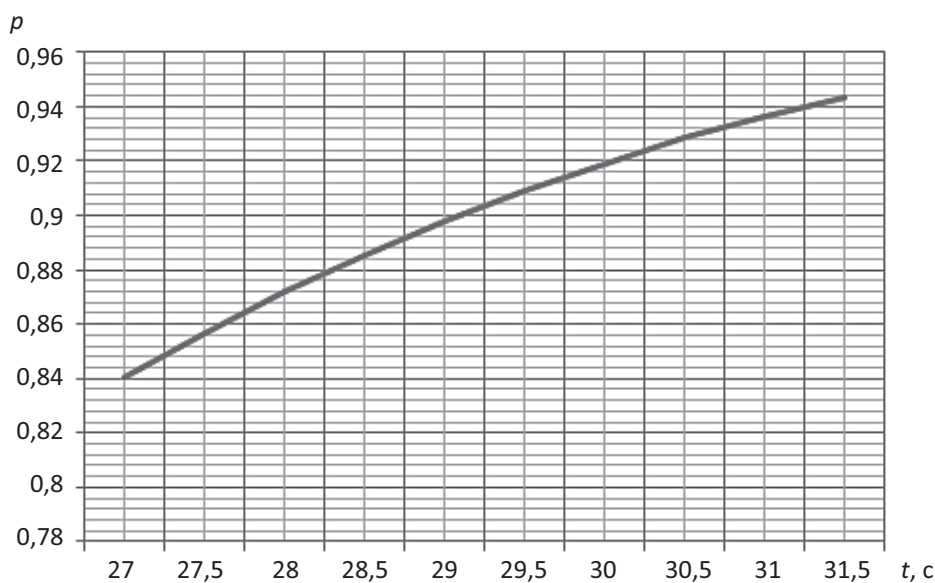
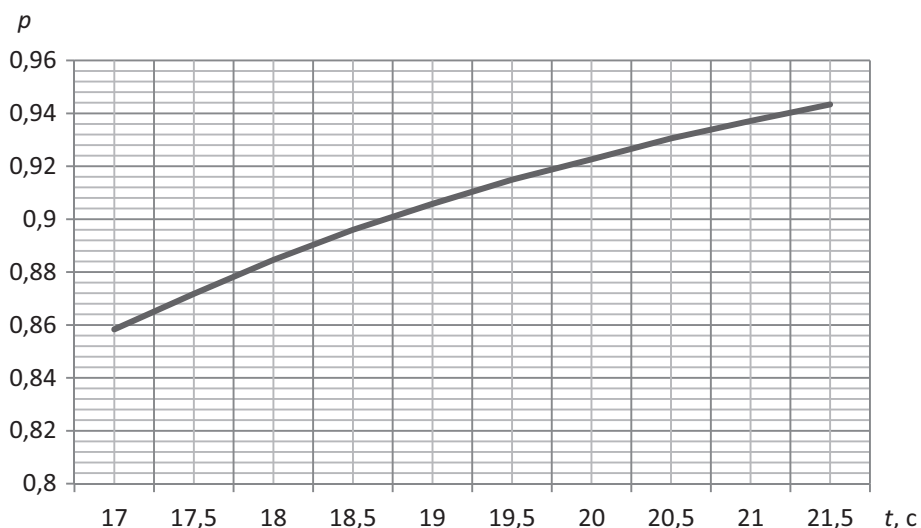


Рис. 2. Вероятность нахождения системы в поглощающем состоянии

Рис. 3. Вероятность нахождения системы в состоянии, где  $m_2 = 3$ 

глощающем состоянии в разные моменты времени.

Для определения  $t_2$  построены графики зависимости вероятности нахождения системы в состояниях, где  $m_2 = 3$ , с помощью аналитической и имитационной моделей. Разница в значениях вероятностей, полученных с помощью обеих моделей, также была только в 4-м знаке после запятой. На рис. 3 приведён

график вероятности нахождения системы в искомым состояниях в разные моменты времени.

Из рис. 2 и 3 видно, что  $t_1$  и  $t_2$  не превышают максимально допустимые для них показатели, следовательно, скорость реакции системы на возникновение внештатной ситуации будет выше нормы и данный узел системы не нуждается в оптимизации.

## Заключение

Описанный в статье метод пригоден для расчёта вероятностно-временных характеристик большого количества нестационарных моделей различной сложности. Благодаря предложенному рекурсивному алгоритму генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих НСО, стала возможна программная реализация таких многопараметрических аналитических моделей, как сетевая и L-канальная.

## Библиографический список

1. Брынь М. Я. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий / М. Я. Брынь, Е. Г. Толстов, А. А. Никитчин и др. // Изв. ПГУПС. – 2009. – Вып. 2 (19). – С. 120–128.

2. Брынь М. Я. Программный комплекс для мониторинга деформаций особо опасных объектов / М. Я. Брынь, А. Д. Хомоненко, В. П. Бубнов, А. А. Никитчин, С. А. Сергеев, П. А. Новиков, А. И. Титов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2014. – № 1. – С. 36–41.

3. Бубнов В. П. Особенности программной реализации численно-аналитического метода расчёта моделей нестационарных систем обслуживания / В. П. Бубнов, А. С. Еремин, С. А. Сергеев // Тр. СПИИРАН. – 2015. – № 1. – С. 218–232.

4. Бубнов В. П. Рекурсивный метод генерации матрицы коэффициентов системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания / В. П. Бубнов, А. Д. Хомоненко, С. А. Сергеев // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. Т. 1, секция 1–3. 2015. – С. 164–166.

5. Сергеев С. А., Бубнов В. П., Бубнов В. В. Программа для имитационного моделирования нестационарных систем обслуживания. Роспатент : Свид-во о гос. регистрации программы ЭВМ № 201561735. – М., 2015.

6. Сергеев С. А., Бубнов В. В., Еремин А. С. Программа для расчёта вероятностей состояний нестационарных систем обслуживания. Роспатент : Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014662753. – М., 2014.

7. Li A. Q. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data – progress in research/development of «Structural Health Monitoring» / A. Q. Li, Y. L. Ding, H. Wang, T. Guo // Sci. China Ser. E: Technol. Sci. – 2012. – Vol. 55, N 8. – P. 2212–2224.

8. Li S. L. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge / S. L. Li, H. Li, Y. Liu et al. // Struct. Control and Health Monit. – 2014. – Vol. 21, N 2. – P. 156–172.

9. Spencer B. F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors: Report N NSEL-040 / B. F. Spencer. – Department of Civil and Environ. Eng. Univ. Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.

10. Watanabe E. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction / E. Watanabe, H. Furuta, T. Yamaguchi, M. Kano // Struct. Infrastruct. Eng. – 2014. – Vol. 10, N 4. – P. 471–491.

## References

1. Bryn M. Ya., Tolstov Ye. G., Nikitchin A. A., Reznik B., Yashchenko A. I., Yevstafiyev O. V. & Kuchumov V. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2009, Is. 2 (19), pp. 120–128.

2. Bryn M. Ya., Khomonenko A. D., Bubnov V. P., Nikitchin A. A., Sergeyev S. A., Novikov P. A. & Titov A. I. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternyye sistemy – Information Security Problems. Computer Systems*, 2014, no. 1, pp. 36–41.

3. Bubnov V. P., Yeremin A. S. & Sergeyev S. A. *Trudy SPIIRAN – Proc. of St Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sci.*, 2015, no. 1, pp. 218–232.

4. Bubnov V. P., Khomonenko A. D. & Sergeyev S. A. *Rekursivny metod generatsii matritsy koefitsientov sistemy odnorodnykh differentsialnykh uravneniy, opisyvayushchikh nestatsionarnuyu sistemu obsluzhivaniya* [Recursive Method for Generation

of Coefficient Matrix for a Homogeneous Differential Equations System Which Describe a Non-Stationary Service System]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (Int. Conf. for Soft Computing and Measurements)*, 2015. Vol. 1, section 1–3. Pp. 164-166.

5. Sergeev S.A., Bubnov V.P., Bubnov V.V. Program for Imitation Simulation of Non-Stationary Service Systems. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. State program registration certificate N 201561735. Moscow, 2015.

6. Sergeev S.A., Bubnov V.V., Yerebin A. S. Program for Calculation of Probabilities of Condition of Non-Stationary Service Systems. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. State program registration certificate N 2014662753. Moscow, 2015.

7. Li A.Q., Ding Y.L., Wang H. & Guo T. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data-

progress in research/development of ‘Structural Health Monitoring’. *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.*, 2012, Vol. 55, no. 8, pp. 2212-2224.

8. Li S.L., Li H., Liu Y., Lan C., Zhou W. & Ou J. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge. *Struct. Control and Health Monit.*, 2014, Vol. 21, no. 2, pp. 156-172.

9. Spencer B.F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors. Report no NSEL-040, Department of Civil and Environ. Eng. Univ. Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.

10. Watanabe E., Furuta H., Yamaguchi T. & Kano M. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 2014, Vol. 10, no. 4, pp. 471-491.

СЕРГЕЕВ Сергей Александрович – аспирант, ассистент, serega\_svetl@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).