

Повышение оперативности принятия решений при возникновении чрезвычайных ситуаций в киберфизических распределенных производственных системах

Д. В. Шелковий¹, О. Ю. Сивченко², Е. Е. Усина², А. Н. Быков²

¹ Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Российская Федерация, 302015, Орел, ул. Приборостроительная, 35

² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39

Для цитирования: Шелковий Д. В., Сивченко О. Ю., Усина Е. Е., Быков А. Н. Повышение оперативности принятия решений при возникновении чрезвычайных ситуаций в киберфизических распределенных производственных системах // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17. Вып. 1. С. 72–80. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.107>

В статье представлены результаты апробирования существующих математических моделей, позволяющих произвести оперативную оценку требуемого канального ресурса для обслуживания потоков данных, генерируемых элементами подсистемы технического зрения в киберфизических распределенных производственных системах. Методом имитационного эксперимента выявлены зависимости между достижимой задержкой обработки пакетов мультимедийного трафика в коммутационных системах и канальным ресурсом, резервируемым для его передачи. Полученные зависимости предполагается использовать при разработке алгоритма адаптивного управления канальным ресурсом с целью повышения оперативности принимаемого решения в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: канальный ресурс, качество обслуживания, сенсорная система, киберфизическая система, распределенная производственная система, оперативность, чрезвычайная ситуация.

1. Введение. Экономический рост и стабильность государств с сырьевой экономикой в значительной степени зависят от уровня технологического совершенства распределенных производственных систем (РПС), который в основном определяется оптимальным функционированием систем автоматического и автоматизированного управления [1, 2].

В последнее время в управлении РПС значительную популярность приобретают технологии интернета вещей, интеллектуального анализа данных (data mining), больших данных, интеллектуального планирования и контроля [3, 4]. Их применение, а также другие методы цифровизации производства позволяют рассматривать некоторые РПС как киберфизические системы (КФС) [5].

Особенностью КФС является необходимость поддержания каналов связи со стабильными параметрами скорости передачи данных, вносимой задержки между исполнительными устройствами и узлами управления для своевременной и качественной доставки заданных объемов разнородных данных, генерируемых элементами сенсорных систем. В настоящее время стабильность передаточных характеристик каналов связи на основе IP-технологии, арендуемых у операторов Единой сети электросвя-

зи, гарантируется посредством применения технологий «жесткого» резервирования канального ресурса, например MPLS-TE [6].

Формирование агрегированных потоков данных производится на конечных сетевых узлах. При возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) объемы передаваемых в КФС данных от элементов сенсорной системы могут составлять гига- и терабайты. Аналитическая и алгоритмическая обработка главным вычислительным устройством (ГВУ) полученных данных может занимать продолжительное время, что в итоге снижает оперативность принятия решения в условиях ЧС. Одним из путей повышения оперативности принятия решения является введение приоритетов передаваемых данных, учитывающих характер возникшей ЧС. Для передачи более высокоприоритетных объемов данных требуется резервировать больше канального ресурса. Это позволит снизить время доставки формируемых блоков данных, и в конечном итоге ГВУ сможет сформировать эффективные управленческие решения за меньшее время [7].

Цель настоящей работы — апробация существующих математических моделей оперативного оценивания канального ресурса для потоков данных, генерируемых элементами подсистемы технического зрения в КФС.

2. Формализация математической модели агрегированного потока данных киберфизических РПС. В общем виде математическая модель КФС [5] может быть представлена описанием следующих элементов и их параметров:

- конечные узлы (датчики, сенсоры, видеокамеры, элементы акустической обработки информации), расположенные в каждом разнесенном географическом сегменте N_j , где $j = (0, \dots, 5)$ — класс трафика, генерируемый датчиками;

- сеть передачи данных (параметры каналов передачи, связывающих сенсорные системы сегментов КФС с ГВУ: скорость передачи R (Мбит/с), протяженность линии связи S (км);

- состояние окружающей среды и внешних условий каждого сегмента КФС, при изменении которых возникает ЧС, что требует оперативного управленческого воздействия на элементы производственной инфраструктуры отрасли $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_v\}$;

- управляемые объекты каждого сегмента КФС представляют собой вектор $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_I\}$, где каждый i -й объект множества A_i может находиться в состоянии «норма (Н)», «тревога (Т)» или «опасность (О)», например нагрев элементов бурения, местоположение вращающихся элементов, давление и температура в скважине и др.;

- приоритет исходных данных при возникновении ЧС $\alpha_j(A_i, \theta_v)$;

- время, требуемое для передачи заданного объема данных j -го класса с конечных устройств t_{V_j} (мс).

Вектор управляющих воздействий для каждого сегмента КФС формируется после получения информации о внутренних и внешних факторах всех сегментов КФС и последующей оценки эффективности функционирования системы при реализации определенного управления. В формализованном виде вектор управляющих воздействий для каждого сегмента КФС принимает вид

$$X = F(A_i, \theta, T_{\text{Oy}}^{\text{P}}),$$

где T_{Oy}^{P} — время, необходимое для получения всех требуемых данных до выработки вектора возможных управляющих решений; F — функция управляющих воздействий.

Оперативность принимаемого управленческого решения складывается из времени, необходимого для принятия информационного решения $t_{\text{пр}}$, и времени изменения конфигурации управляющих объектов $t_{\text{конф}}$: $T_{\text{Oy}}^{\text{P}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{конф}}$.

Повышение эффективности функционирования КФС, по нашему мнению, происходит за счет минимизации времени на принятие решения при условии заданной обоснованности принимаемого решения: $t_{\text{пр}} \rightarrow \min (K_{\text{пнр}} \leq K_{\text{пнр}}^{\text{тр}})$, где $K_{\text{пнр}}$ и $K_{\text{пнр}}^{\text{тр}}$ — соответственно коэффициент риска подготовки некачественного решения и его требуемое значение.

Оценка времени принятия информационного решения определяется математическим ожиданием и дисперсией времени на получение требуемого объема информации каждого j -го класса трафика для принятия решения:

$$t_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^J t_{V_j} = \sum_{j=1}^J \frac{3t_{V_j}(\text{min}) + 2t_{V_j}(\text{max})}{5}, \quad \sigma^2 = \sum_{j=1}^J \sigma_{V_j}^2 = \sum_{j=1}^J \left(\frac{t_{V_j}(\text{max}) - t_{V_j}(\text{min})}{5} \right)^2.$$

Каждый n_j -й сенсор (датчик) характеризуется некоторым объемом генерируемых данных за единицу времени. По аналогии с терминалами сетей связи сенсоры и датчики можно представить как источники трафика с постоянной или переменной скоростью, предъявляющие различные требования к качеству функционирования сети (вносимая сетью задержка, джиттер и вероятность потери пакетов).

При мультимедийном характере передаваемых потоков данных системы технического зрения математическое моделирование сводится к следующей оценке параметров качества обслуживания на уровне пакетов:

$$t_{V_j} = F(\tau_j, P_j, \Delta\tau_j, R_j, S),$$

где τ_j — «сквозная» задержка доставки блока данных j -го класса; P_j — вероятность потери блока данных при передаче по сети; $\Delta\tau_j$ — джиттер задержки при повторяющейся структуре потока данных; S — протяженность линии связи (км).

3. Апробация существующих моделей оценки требуемого канального ресурса для агрегированного потока данных. Проведенный анализ существующих математических моделей агрегированных потоков данных позволил провести их классификацию по применяемому математическому аппарату:

- 1) класс моделей теории телетрафика, в том числе с оценкой параметров качества обслуживания на уровне пакетов [8];
- 2) модели на основе вероятностных оценок параметров качества обслуживания и мгновенных значений пиковой достижимой скорости передачи данных [9];
- 3) модели на основе математического аппарата прогнозирования [10];
- 4) модели самоподобия структуры потока данных [11];
- 5) модели на основе математического аппарата детерминированного и стохастического сетевого исчисления [12];
- 6) статистические модели агрегированного потока данных [13];
- 7) математические модели планировщиков [14].

Достоинства и недостатки каждого из представленных классов моделей, точность получаемых оценок и возможность их применения в конкретных условиях определяются прежде всего принятыми допущениями и ограничениями при решении задачи.

В рамках настоящего исследования оценивание требуемого канального ресурса для динамически меняющейся структуры потока данных, создаваемой заранее известным количеством элементов сенсорной системы КФС при известных параметрах генерируемого ими трафика, произведем, применяя три различных класса моделей.

В частности, используем

– модель эффективной скорости передачи данных:

$$R^{\text{эфф}}(n) = \left(1 - \frac{1}{50} \log P\right) \cdot r_j \cdot \left(1 + 3 \left(-\frac{2p_j}{R} \log P\right) \left(1 - \frac{r_j}{p_j}\right)\right), \quad (1)$$

в которой P – нормированное значение вероятности потери пакетов; r_j – средняя скорость передачи данных; p_j – пиковая скорость передачи данных; n – номер сенсора;

– модель агрегированного потока данных на основе вероятностных неравенств:

$$R^{\text{BH}}(n) = nr_j + \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1}{P}\right) \cdot \sum_{i=1}^n (p_j)^2}{2}}; \quad (2)$$

– модель потока данных на основе теории детерминированного сетевого исчисления:

$$R^{\text{ДСИ}}(n) = \frac{np_j \left(\frac{nb_j - L_j}{n(p_j - r_j)} + 2L_j\right)}{tv_j(\text{ТР}) + \frac{nb_j - L_j}{n(p_j - r_j)} - \frac{L_j}{R_k}}, \quad (3)$$

где L_j – максимальный размер пакета данных; b_j – размер буфера, выделяемого для j -го класса трафика; $tv_j(\text{ТР})$ – требуемое значение верхней границы вносимой задержки на обработку каждого пакета данных.

Оценивание достижимого уровня качества обслуживания видеотрафика, генерируемого подсистемой технического зрения, при резервировании канального ресурса для агрегированного потока данных с использованием моделей (1)–(3) проведем методом имитационного эксперимента, успешно реализуемого для подобного рода задач [15]. При имитационном моделировании введем такие ограничения и допущения:

- потоки данных от элементов сенсорной системы передаются пакетами максимальной длины;
- все элементы сенсорной системы функционируют непрерывно;
- вносимую задержку и потери пакетов в пересчете на один узел коммутации осуществим, исходя из равномерного распределения потерь пакетов и вносимой задержки на всех сетевых элементах тракта.

4. Экспериментальное оценивание достижимого уровня качества обслуживания. Исходными данными для моделирования выступают требования к уровню качества обслуживания для 0-го класса трафика [16], генерируемого заданным количеством оптоэлектронных преобразователей с определенной разрешающей способностью, пиковой и средней скоростями генерации данных, а также параметры генерируемого трафика на уровне пакетов (максимальный размер пакета, минимальный межпакетный интервал), размер резервируемого в узлах коммутации буфера и канального ресурса для передачи агрегированного потока данных.

Выходными данными имитационной модели выступают параметры качества обслуживания на уровне пакетов: вероятность потери пакетов, задержка пакетов, джиттер. Структурная схема имитационной модели представлена на рис. 1, моделирующий алгоритм – на рис. 2.

Исследование применимости математических моделей проведем для условного сегмента КФС, состоящего из 100 видеокамер с разрешающей способностью, равной 2 и 5 Мп, используемыми кодеками типа H.264, H.265 и параметрами мгновенной

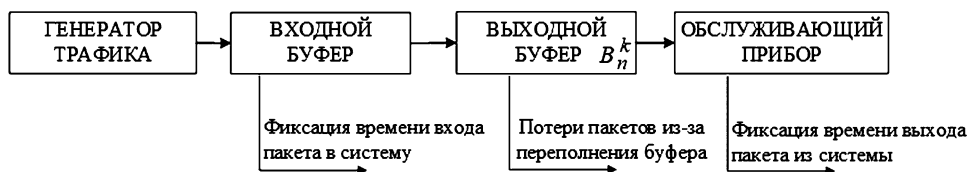


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели сегмента киберфизической распределенной производственной системы

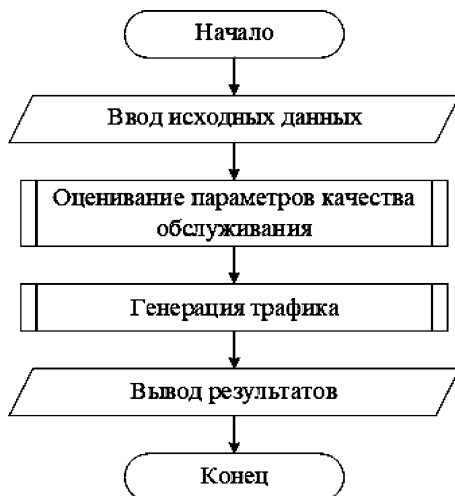


Рис. 2. Моделирующий алгоритм имитационной модели сегмента киберфизической распределенной производственной системы

пиковой и средней скоростей в течение длительности сеанса обмена данными, представленными в таблице.

Скорость передачи по каналу связи примем равной 2.5 Гбит (STM-16), максимальную длину передаваемого пакета данных — 1500 байт, согласно результатам исследований, представленным в [17]. Размер буфера ориентирован на временное хранение 5 пакетов. Требуемые численные значения параметров качества обслуживания для заданного класса трафика, а также методика проведения измерений приведены в [16]. Величина требуемой задержки обработки пакета в пограничном маршрутизаторе сети не должна превышать 3 мс, доля потерянных пакетов должна быть не выше 0,1%, при которой проблемы с картинкой возникают не чаще 1 раза в 10 с. Рассчитанные значения требуемой величины канального ресурса для обеспечения заданной задержки каждого потока данных и вероятности потери пакетов для каждого потока данных, входящего в состав агрегированного потока, при заданных исходных данных представлены на рис. 3, а, б; оцененные значения достижимого уровня качества обслуживания — на рис. 4, а, б.

Анализ полученных результатов показал, что математическая модель на основе эффективной скорости передачи данных не позволяет адекватно оценить требуемый канальный ресурс для обслуживания потоков данных, генерируемых элементами системой технического зрения при заданной разрешающей способности, равной 2 Мп, и формате сжатия видеотрафика H.264 при количественном составе конечных эле-

Таблица. Исходные данные для проведения моделирования

Видеокодек	Разрешающая способность, Мп			
	2		5	
	Пиковая скорость	Средняя скорость	Пиковая скорость	Средняя скорость
H.264	5	2.7	11	4.8
H.265	3	1.2	5	2.1

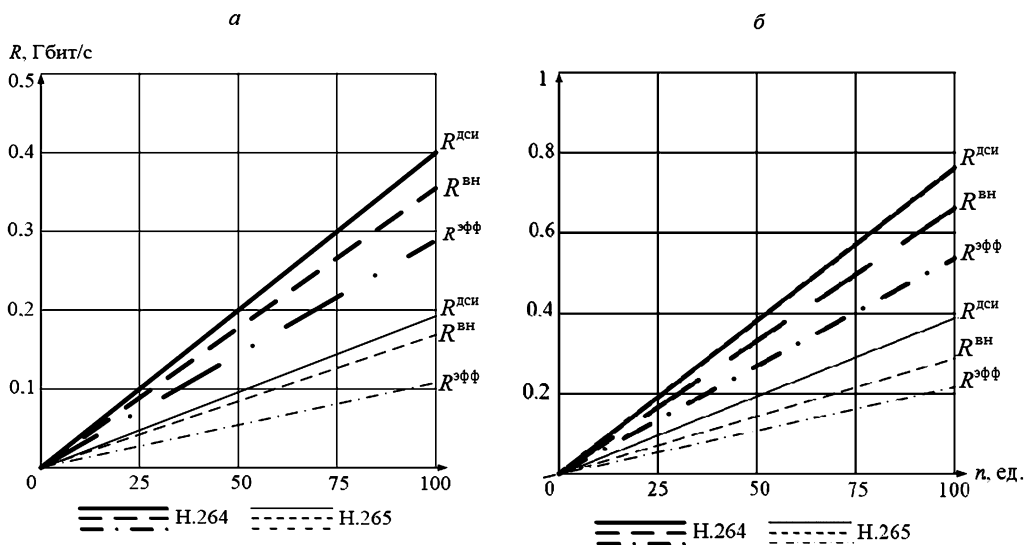


Рис. 3. Рассчитанные значения требуемой величины канального ресурса для обслуживания предложенной нагрузки

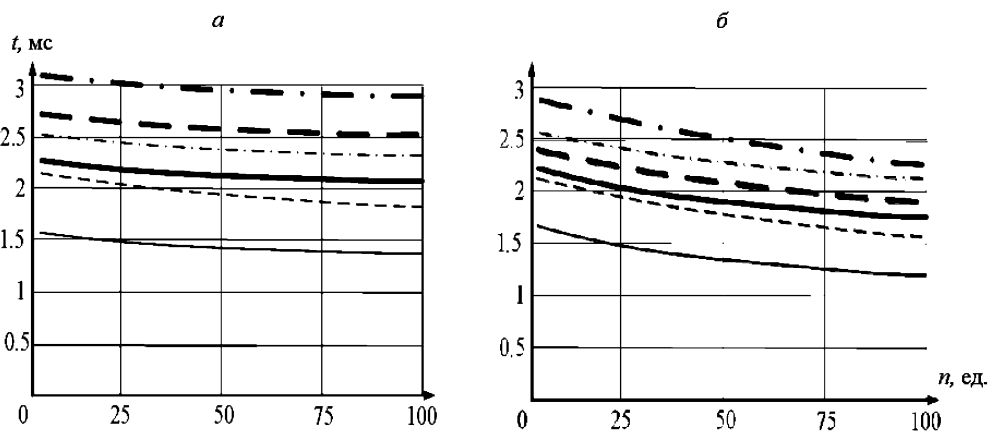


Рис. 4. Оцененные значения достижимого уровня качества обслуживания

ментов до 30 ед., с точки зрения обеспечения достижимого уровня качества обслуживания. Математическая модель агрегированного потока данных на основе вероят-

ностных неравенств и модель потока данных на основе теории детерминированного сетевого исчисления позволяют адекватно оценить требуемый каналный ресурс для потоков данных, генерируемых элементами системы технического зрения, на всем диапазоне исследуемых входных данных.

5. Заключение. Представленные зависимости можно использовать при разработке алгоритмов адаптивного управления каналным ресурсом, позволяющих повысить оперативность принятия управленческого решения в условиях возникновения ЧС за счет минимизации вносимой задержки на передачу приоритетных потоков данных. Обеспечение предельной задержки на обработку пакетов в узлах коммутации сегмента КФС является наиболее важной задачей с точки зрения обеспечения требуемого уровня качества обслуживания [18, 19], поскольку это позволяет, кроме того, гарантировать предельное значение джиттера задержки.

Литература

1. *Abreu J.* Business processes improvement on maintenance management: A case study // *Procedia Technology*. 2013. Vol. 9. P. 320–330.
2. *Fleischmann H., Kohl J., Franke J., Reidt A.* Improving maintenance processes with distributed monitoring systems // 13-th International Conference on Industrial Informatics. 2016. Vol. 13. P. 377–382.
3. *Yin S., Kaynak O.* Big data for modern industry: Challenges and trends // *Proceedings of IEEE*. 2015. Vol. 103. N 2. P. 143–146.
4. *Kranzer S.* An intelligent maintenance planning framework prototype for production systems // 18-th Annual International Conference on Industrial Technology. *Proceedings of IEEE*. 2017. P. 1124–1129.
5. *Ватаманюк И. В., Яковлев П. Н.* Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // *Известия Юго-Запад. гос. ун-та*. 2019. Т. 23. № 6. С. 161–175.
6. *Osborne E. D., Simha A.* Traffic engineering with MPLS. Moscow: Cisco Press, 2003. 608 p.
7. *Calinescu R. C., Camara Moreno J., Paterson C.* Socio-cyber-physical systems: models, opportunities, open challenges // 5-th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems. York. 2019. P. 2–6.
8. *Levakov A., Sokolov A., Sokolov N.* Models of incoming traffic in packet networks // *T-Comm*. 2015. Vol. 9. N 5. P. 91–94.
9. *Шелковий Д. В.* Модель узла коммутации корпоративной мультисервисной сети связи // *Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Экономика. Информатика*. 2017. № 42. С. 148–157.
10. *Gama J.* On evaluating stream learning algorithms // *Machine Learning*. 2013. Vol. 90. Iss. 3. P. 317–346.
11. *Millan G., Lanfranc G.* A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks // *Procedia Computer Science*. 2013. Vol. 17. P. 420–425.
12. *Шелковий Д. В., Миронов О. Ю., Басов О. О.* Моделирование потоков данных реального времени в защищенных корпоративных мультисервисных сетях связи на основе детерминированного сетевого исчисления // *Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Экономика. Информатика*. 2018. Т. 45. № 3. С. 584–594.
13. *Кучук Г. А.* Метод оперативной оценки статистических характеристик агрегированного трафика // *Авиационно-космическая техника и технология. Науч.-технич. журн. Харьков*, 2013. № 7. С. 211–214.
14. *Вегашина Ш.* Качество обслуживания в сетях IP / пер. с англ. М.: Издат. Дом «Вильямс», 2003. 368 с. (*Vegeshina S.* IP quality of service.)
15. *Nguyen T.* Formal requirements modeling for simulation-based verification // 11-th International Modelica Conference. 2015. P. 622–635.
16. Рекомендация МСЭ-Т Y.1541. Требования к сетевым показателям качества для служб, основанных на протоколе IP. Сер. Y: Глобальная информационная инфраструктура, аспекты меж-сетевого протокола и сети последующих поколений. ITU, 2011.
17. *Киреева Н., Чупахина Л., Караулова О.* Аппроксимация multicast трафика с помощью уравнения Линдли // *Междунар. журн. прикл. и фундамент. исследований*. 2017. № 4–2. С. 313–317.
18. *Левоневский Д. К., Ватаманюк И. В., Малов Д. А.* Обеспечение доступности сервисов корпоративного интеллектуального пространства посредством управления потоком входных данных // *Программная инженерия*. 2019. Т. 10. № 1. С. 20–29. <https://doi.org/10.17587/prin.10.20-29>

19. Малов Д. А., Едемский А. Ю., Савельев А. И. Разработка системы проактивной локализации киберфизического пространства на основе методов машинного обучения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2018. № 4. С. 72–83. <https://doi.org/10.14357/20718632180408>

Статья поступила в редакцию 28 августа 2020 г.

Статья принята к печати 15 января 2021 г.

Контактная информация:

Шелковый Денис Витальевич — shelkoydenis@mail.ru

Сивченко Олег Юрьевич — oleg.sivchenko@yandex.ru

Усина Елизавета Евгеньевна — мл. науч. сотр.; lizzzi96@mail.ru

Быков Александр Норайрович — 124alex.96@mail.ru

Improving the efficiency of decision-making during emergency situations in cyberphysical distributed production systems

D. V. Shelkovyy¹, O. Yu. Sivchenko², E. E. Usina², A. N. Bykov²

¹ Russian Federation Security Guard Service Federal Academy,

35, Priborostroitel'naya ul., Orel, 302015, Russian Federation

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,

39, 14-ia liniya V. O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation: Shelkovyy D. V., Sivchenko O. Yu., Usina E. E., Bykov A. N. Improving the efficiency of decision-making during emergency situations in cyberphysical distributed production systems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2021, vol. 17, iss. 1, pp. 72–80. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.107> (In Russian)

This paper presents results of approbation of existing mathematical models, enabling operative assessment of the required link resource to serve data streams, generated by the elements of technical vision subsystem in cyberphysical distributed production systems. Simulation experiments allowed to discover dependencies between achievable multimedia traffic packet processing delay in switching systems and link-level resource, reserved for respective data transfer. Obtained dependencies are to be used during design of algorithm for link resource control for increasing speed of decision making in emergency.

Keywords: link resource, quality of service, sensory system, cyberphysical system, distributed production system, operational efficiency, emergency.

References

1. Abreu J. Business processes improvement on maintenance management: A case study. *Procedia Technology*, 2013, vol. 9, pp. 320–330.
2. Fleischmann H., Kohl J., Franke J., Reidt A. Improving maintenance processes with distributed monitoring systems. *13-th International Conference on Industrial Informatics*, 2016, vol. 13, pp. 377–382.
3. Yin S., Kaynak O. Big data for modern industry: Challenges and trends. *Proceedings of IEEE*, 2015, vol. 103, no. 2, pp. 143–146.
4. Kranzer S. An intelligent maintenance planning framework prototype for production systems. *18-th Annual International Conference on Industrial Technology. Proceedings of IEEE*, 2017, pp. 1124–1129.
5. Vatamaniuk I. V., Iakovlev R. N. Obobshchennye teoreticheskie modeli kiberfizicheskikh system [Generalized theoretical models of cyberphysical systems]. *Izvestiya Iugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the Southwest State University]*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 161–175. (In Russian)
6. Osborne E. D., Simha A. *Traffic engineering with MPLS*. Moscow, Cisco Press, 2003, 608 p.
7. Calinescu R. C., Camara Moreno J., Paterson C. Socio-cyber-physical systems: models, opportunities, open challenges. *5-th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems*. York, 2019, pp. 2–6.

8. Levakov A., Sokolov A., Sokolov N. Models of incoming traffic in packet networks. *T-Comm.*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 91–94.
9. Shelkovy D. V. Model' uzla kommutatsii korporativnoj mul'tisensornoj seti svyazi [The model company multiservice network node model]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Informatika* [Scientific of lists of Belgorod State University. Economics. Informatics], 2017, no. 42, pp. 148–157. (In Russian)
10. Gama J. On evaluating stream learning algorithm. *Machine Learning*, 2013, vol. 90, iss. 3, pp. 317–346.
11. Millan G., Lanfranc G. A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks. *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 17, pp. 420–425.
12. Shelkovy D. V., Mironov O. Y., Basov O. O. Modelirovanie potokov dannykh real'nogo vremeni v zashishennykh korporativnykh mul'tiservisnykh setyakh svyazi na osnove determinirovannogo setevogo ischisleniya [The real-time data streams modelling in secure corporate multiservice communication networks by application of deterministic network calculus theory]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific of lists of Belgorod State University. Economics. Informatics], 2018, vol. 45, no. 3, pp. 584–594. (In Russian)
13. Kuchuk G. A. Metod operativnoj otsenki statisticheskikh kharakteristik agregirovannogo trafika [Method of the aggregated traffic statistical descriptions operative estimation]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal* [Aerospace engineering and technology. Scientific and technical Journal]. Khar'kov, 2013, no. 7, pp. 211–214. (In Russian)
14. Vegesna S. *IP quality of service*. Moscow, Cisco Press, 2001, 368 p. (Russ. ed.: Vegesna S. *Kachestvo obsluzhivaniya v setyah IP*. Moscow, Izdat. Dom "Vill'ams" Publ., 2003, 368 p.)
15. Nguen T. Formal requirements modeling for simulation-based verification. *11-th International Modelica Conference*, 2015, pp. 622–635.
16. Rekomendatsiya MSEH-T Y. 1541. Trebovaniya k setevym pokazatelyam kachestva dlya sluzhb, osnovannykh na protokole IP. Seriya Y. Global'naya informatsionnaya infrastruktura, aspekty mezhssetevogo protokola i seti posleduyushchikh pokolenij. [ITU-T Recommendation. Y. 1541. Requirements for network performance indicators for IP-based services. Series Y. Global information infrastructure, aspects of the internetwork protocol and the next-generation network]. ITU, 2011.
17. Kireeva N. V., Chupakhina L. R., Karaulova O. A. Approksimatsiya multicast trafika s pomoshh'yu uravneniya Lindli [Approximation of the multicast traffic by using the lindley equation]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij* [International Journal of Applied and Basic Research], 2017, no. 4–2, pp. 313–317. (In Russian)
18. Levonevskij D. K., Vatamanyuk I. V., Malov D. A. Obespechenie dostupnosti servisov korporativnogo intellektual'nogo prostranstva posredstvom upravleniya potokom vkhodnykh dannykh [Ensuring the availability of corporate intellectual space services by controlling the flow of input data]. *Programmnaya inzheneriya* [Software engineering], 2019, vol. 10, no. 1, pp. 20–29. <https://doi.org/10.17587/prin.10.20-29> (In Russian)
19. Malov D. A., Edemskij A. Y., Savel'ev A. I. Razrabotka sistemy proaktivnoj lokalizatsii kiberfizicheskogo prostranstva na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Development of a proactive cyber-physical localization system based on machine learning methods]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technology and computing systems], 2018, no. 4, pp. 72–83. <https://doi.org/10.14357/20718632180408> (In Russian)

Received: August 28, 2020.

Accepted: January 15, 2021.

A u t h o r s ' i n f o r m a t i o n :

Denis V. Shelkovy — shelkoydenis@mail.ru

Oleg Yu. Sivchenko — oleg.sivchenko@yandex.ru

Elizaveta E. Usina — Junior Scientific Collaborator; lizzzi96@mail.ru

Aleksandr N. Bykov — 124alex.96@mail.ru