

ON PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

O. Y. Tarkhanova, V. V. Shakhov*

Institute of Cytology and Genetics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Novosibirsk State Technical University

DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10003

Nowadays, Internet of Things (IoT) has received increased attention in many countries. IoT and Big Data technologies have a tremendous impact on all fields of human life. In the Russian Federation, a roadmap for the IoT development is presented by the Ministry of Industry and Trade. Issues of development and implementation of IoT technologies are in the focus of attention of senior government authorities. According to Cisco Systems, this year 50 billion devices will be connected to the Internet. McKinsey (an international consulting company specializing in strategic management advice) estimates the economic impact of IoT development at USD 11 trillion by 2025. Note that there are several standardization projects and initiatives in sensor networks that can ultimately converge with the Internet of things. For example, this concerns proposals developed as part of the projects of the 7th EU Framework Programme for the development of scientific research and technology (IoT-A). Other appropriate projects include COBIS, SENSEI, SARIF. The international non-profit organization Open Geospatial Consortium has developed and supported a set of standards for requesting, transmitting and processing sensor data via the Web. To standardize the inclusion of sensors in the IoT architecture, a number of initiatives have been proposed, for example, IEEE 1451, ISO / ICE 24753. Great progress in the field of micro-electro-mechanical technologies has enabled the development of inexpensive sensor nodes that communicate wirelessly. A wireless sensor network is a self-organizing group of spatially distributed sensors for monitoring environmental conditions and delivering the collected data in a decision center. Wireless sensor networks (WSNs) can be used in a wide range of applications, such as precision agriculture, air pollution monitoring, smart home etc. However, a sensor has to be compact and inexpensive. This is a stringent demand of market. A consequence of the low cost of the sensors is a significant limitation of their resources (battery capacity, computing capabilities, memory etc.). This restriction significantly affects the performance and reliability of both individual sensors and the network as a whole, which contradicts the requirements for technologies used in critical areas of human life. Thus, efficient tools for assessing the effectiveness of WSNs are required. In this paper we partially fill the mentioned gap.

We develop a theoretical approach for modeling and analyzing DoB attacks. The proposed methods are based on continuous time Markov chains. The theory of Markov process is generally used when the various quality metrics of WSNs are calculated. In previous papers the specifics of the network topology are often not taken into account. On the other hand, in a number of studies, focus has been placed on optimizing the network topology, while the characteristics of its elements are assumed to be given (e.g. the probabilities of nodes availability and their dynamic). An existent approach

This work was supported by the ICM&MG base project No 0315-2016-0006

combining the accounting of the network topology, the details of the operation of its nodes, the quality of the channels is described as a general idea. Here, we apply this one for a specific application. Also, we investigate a situation when the optimal network topology does not exist in the general case. The best topology is determined by the parameters of the environment and duty, and also depends on time. The corresponding example has been provided. A method for WSNs performance analysis based on temporary colored Petri nets has been proposed. To verify the approach we use a typical LoRaWAN topology, for example the similar topology has been used in digital farming, Edge computing applications, etc. The results of performance analysis have been visualized and presented.

Key words: Wireless Sensor Networks, Performance Analysis, Markov chain, Petri Nets.

References

1. Uckelmann D., Harrison M., Michahelles F. Architecting the Internet of Thing. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011. P. 10–11.
2. Cho J. et al. SARIF: A Novel Framework for Integrating Wireless Sensor and RFID Networks. Dec. 2007 // IEEE Wireless Commun. V. 14. N 6. P. 50–56.
3. Tarhanova O. Y. Application of wireless sensor networks in precision agriculture. Problems of Informatics, No 4, 2017, P. 16–46. (in Russian)
4. Romer K. and Mattern F. The design space of wireless sensor networks // IEEE Wireless Commun. Dec. 2004. V. 11. N 6. P. 54–61.
5. Shakhov Vladimir. Performance Evaluation of MAC Protocols in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks. Lecture Notes in Computer Science // Springer. 2016. V. 9787. P. 344–352.
6. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P. and Soljacic M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances // Science. 2007. V. 317. N 5834. P. 83–86.
7. Yang, S. Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications // Springer-Verlag London. 2014. ISBN 978-1-4471-5505-8.
8. Karl, H. & Willig, A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons. 2007.
9. Borges L. M., Velez F. J., Lebres A. S. Survey on the characterization and classification of wireless sensor networks applications // IEEE Commun. Surv. Tuts., Nov. 2014. V. 16. N 4. P. 1860–1890.
10. Ding Z. etc. Impact of Optimal Hop Distance on the Network Lifetime for Wireless Sensor Networks With QoS Requirements // IEEE Communications Letters. 2019. Vol. 23. N 3.
11. Xiaobo Tan, Hai Zhao, Guangjie Han, Wenbo Zhang, Teng Zhu QSDN-WISE: A New QoS-Based Routing Protocol for Software-Defined Wireless Sensor Networks // Access IEEE. 2019. V. 7. P. 61070–61082.
12. Atia G. K., Veeravalli V. V., and Fuemmeler J. A. Sensor scheduling for energy-efficient target tracking in sensor networks // IEEE Trans. Signal Process., Oct. 2011. V. 59. N 10. P. 4923–4937.
13. Yeow W.-L., Tham C.-K., and Wong W.-C. Energy efficient multiple target tracking in wireless sensor networks // IEEE Trans. Veh. Technol., Mar. 2007. V. 56. N 2. P. 918–928.
14. Pandana C. and Liu K. R. Near-optimal reinforcement learning framework for energy-aware sensor communications // IEEE J. Sel. Areas Commun., Apr. 2005. V. 23. N 4. P. 788–797.
15. Shakhov Vladimir, Koo Insoo. Depletion-of-Battery Attack: Specificity, Modelling and Analysis // Sensors, June 2018. V. 18. N 6.
16. Chau, C.; Qin, F.; Sayed, S.; Wahab, M.; Yang, Y. Harnessing battery recovery effect in wireless sensor networks: experiments and analysis // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2010. N 28. P. 1222–1232.
17. Bouabdallah, F.; Bouabdallah, N.; Boutaba, R. On balancing energy consumption in wireless sensor networks // IEEE Trans. Veh. Technol. 2009. N 58. P. 2909–2924.

18. Meng, T.; Li, X.; Zhang, S.; Zhao, Y. A Hybrid Secure Scheme for Wireless Sensor Networks against Timing Attacks Using Continuous-Time Markov Chain and Queueing Model // *Sensors*. 2016. N 16. P. 1606.
19. Alsheikh M. A. etc. Markov decision processes with applications in wireless sensor networks: A survey // *IEEE Commun. Surveys Tuts.* 2015. V. 17. N 3. P. 1239–1267, 3rd Quart.
20. Shakhov Vladimir V. A Graph-based Method for Performance Analysis of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks Reliability // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, 2016. V. 391. P. 127–132.
21. Kamgueu P. O., Nataf E., Ndie T. D. Survey on RPL enhancements: A focus on topology, security and mobility // *Computer Communications*. 2018. V. 120. P. 10–21.
22. DATA COLLECTION NETWORK FOR AGRICULTURE AND OTHER APPLICATIONS, US 2014/0024313 A1.
23. Shakhov V. V., Migov D. A. Reliability of Ad Hoc Networks with Imperfect Nodes // *Springer LNCS*, 2014. V. 8715. P. 49–58.
24. Page Lavon B., Perry Jo Ellen. Reliability of Directed Networks using: the Factoring Theorem // *IEEE Transactions on Reliability*, 1989 Dec. V. 38, N 5.
25. Migov D. Parallel Methods for Network Reliability Calculation and Cumulative Updating of Network Reliability Bounds // *Proc. of the IEEE 2nd Russian-Pacif Conference on Computer Technology and Applications*. 2015. P. 1–5.
26. Yu Z. et al. Trustworthiness Modeling and Analysis of Cyber-physical Manufacturing Systems // *IEEE Access*, 2017. V. 5.
27. Peterson James L. Petri net theory and the modeling of systems. MIR Publishers, Moscow. 1984. P. 264 (Russian edition).
28. Jensen Kurt, Kristensen Lars M. Colored Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems / Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
29. [Electron. res.]: <https://zigbeealliance.org/>.
30. Tung H. Y. et al. The generic design of a high-traffic advanced metering infrastructure using ZigBee // *IEEE Trans. Ind. Informat.*, Feb. 2014. V. 10. N 1. P. 836–844.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

О. Ю. Тарханова, В. В. Шахов*

Институт Цитологии и Генетики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 004.942

DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10003

В настоящее время технологиям Интернета вещей уделяется повышенное внимание во всем мире, экономический эффект их внедрения в ближайшие несколько лет оценивается в 11 триллионов долларов США. Дорожная карта развития индустрии Интернета вещей представлена экспертным советом при Министерстве промышленности и торговли Российской Федерации. С проникновением указанных технологий в критические области человеческой жизнедеятельности возрастают требования к эффективности беспроводных сенсорных сетей, которые рассматриваются как архитектурная основа Интернета вещей. Вместе с тем существует дефицит инструментов оценки эффективности указанных систем. В данной статье рассматривается проблема разработки математических и программных средств анализа надежности и производительности сенсорных сетей.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, моделирование технических систем, Марковские процессы, сети Петри.

Введение. В настоящее время тематике Интернета вещей (Internet of Things, IoT) уделяется особое внимание во многих странах. Отмечается, что IoT, вместе с технологиями Big Data, окажет колоссальное влияние на все сферы человеческой жизнедеятельности. В Российской Федерации дорожная карта развития Интернета вещей представлена Министерством промышленности и торговли, вопросы развития и внедрения технологий IoT обсуждаются на самом высоком уровне. По оценке специалистов Cisco Systems, уже в этом году к Интернету будет подключено 50 миллиардов устройств. Международная консалтинговая компания McKinsey, специализирующаяся на рекомендациях по стратегическому управлению, прогнозирует к 2025 году экономический эффект от развития IoT в 11 триллионов долларов США.

Необходимо отметить, что многие решения в области архитектуры IoT опираются на результаты исследований сенсорных сетей [1], в частности, это касается предложений, разработанных в рамках проектов 7-й рамочной программы Европейского Союза по развитию научных исследований и технологий (IoT-A и др.). В рамках проекта COBIS разрабатывались технологические основы применения встроенных беспроводных сенсорных сетей в промышленной среде. Участники проекта SENSEI разработали открытую бизнес-

Работа поддержана базовым проектом ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0006.

ориентированную архитектуру, которая снимает фундаментальные вопросы масштабируемости большого количества глобально распределенных беспроводных сенсоров и исполнительных устройств, предоставляет инфокоммуникационные услуги, обеспечивает надежное взаимодействие с физической средой. В ряде проектов (например, SARIF [2], совместный проект Сеульского национального университета и компании IBM) проводились исследования конвергенции технологий идентификации объектов (RFID), сенсорных сетей и Интернета. Международной некоммерческой организацией Open Geospatial Consortium, ведущая деятельность по разработке стандартов в сфере геопространственных данных и сервисов, разработан и поддерживается набор стандартов Sensor Web Enablement для запроса, передачи и обработки сенсорных данных через Web. Предложены и другие инициативы по стандартизации включения сенсоров в архитектуру IoT, например, IEEE 1451, ISO / IEC 24753.

Область применения беспроводных сенсорных сетей (БСС) обширна. Миниатюрность сенсорных узлов, встроенный радиоинтерфейс, адекватная вычислительная мощность, возможность электропитания от автономных источников и низкое энергопотребление, простота установки в сочетании с относительно невысокой стоимостью создают предпосылки для различных приложений БСС, которые включают системы разнообразного мониторинга, автоматизацию промышленных процессов, системы „умный дом“, персонализированную медицину (нательные сенсорные сети, Wireless Body Area Networks). Особо перспективной областью использования технологий БСС является прецизионное сельское хозяйство [3], эксперты J'son & Partners Consulting утверждают, что данная отрасль стоит на пороге „Второй зеленой революции“.

В то же время сенсоры, из которых состоит БСС, должны быть компактными и недорогими, это является жестким требованием рынка. Следствием низкой стоимости сенсоров является существенное ограничение их ресурсов (емкость батареи, вычислительные возможности, объем памяти и т. д.). Данное ограничение существенно влияет на производительность и надежность как отдельных сенсоров, так и сети в целом, что вступает в противоречие с требованиями к технологиям, используемым в критически важных областях жизнедеятельности человека. Для разрешения указанного противоречия требуется инструментарий оценки эффективности БСС, вопросы разработки которого и рассматриваются в данной статье.

1. Беспроводные сенсорные сети. БСС представляет собой распределенную сеть самоорганизующихся интеллектуальных сенсорных узлов (СУ). Типовая архитектура СУ включает модуль сбора данных (датчики регистрации информации), модуль обработки данных (включает микропроцессор и память), приемопередатчик (соединяет узел сенсора с сетью, обычно используются радиоканалы), источник питания (батарейка, аккумулятор с устройством извлечения энергии из окружающей среды, неавтономный источник питания). Исходя из прикладного назначения конкретной БСС, входящие в нее СУ могут компоноваться дополнительными компонентами, такими как система определения местоположения (GPS), средствами, позволяющими изменить местоположение или конфигурацию (например, ориентацию антенны), устройствами, позволяющими влиять на окружающую среду (в этом случае СУ называют актуатором) и т. д. Рассматривая выполняемые узлами сетевые функции, можно выделить несколько типов СУ:

— Регистратор — окончательное устройство, которое регистрирует на первичную полезную информацию, формирует информационные сообщения и передает в сеть.

— Маршрутизатор, координатор — выполняет функции передачи данных (информационных сообщений), приходящих от сенсоров-регистраторов к другим сенсорам БСС или на базовую станцию.

— Головной узел кластера — имеет возможность накапливать информационные сообщения до некоторого объема с последующей передачей на базовую станцию (или аналогичный узел, но расположенный ближе к базовой станции).

Один и тот же СУ может выполнять указанные выше функции в зависимости от ситуации. Также в БСС имеются мобильные или стационарные базовые станции (sink), как правило гораздо более мощные, чем СУ узлы, которые принимают данные со всей сети и либо передают их по высокоскоростным каналам магистральной сети в глобальные информационные системы, либо загружают в БД локального центра принятия решений, либо предоставляют информацию приложениям верхнего уровня.

БСС могут быть наземными, подземными, подводными, воздушными, они могут размещаться на коже и внутри живых организмов, в том числе человека (т. н. нательные БСС, Wireless Body Area Network). С учетом возможности перемещения СУ в пространстве можно классифицировать существующие архитектуры как стационарные, мобильные и гибридные БСС.

— В стационарной БСС узлы размещаются в фиксированном положении, и в течение срока эксплуатации они не меняют свое положение: например, система управления поливом, мониторинг качества грунтовых вод и контроль над использованием удобрений.

— Мобильная БСС включает в себя СУ, которые со временем меняют свое положение. Примером приложений, основанных на такой архитектуре, являются автомобильные самоорганизующиеся сети (VANET, V2V), БСС, развернутые на беспилотных аппаратах и т. п.

— Гибридная архитектура: в данной архитектуре присутствуют как стационарные, так и мобильные узлы. Например, БСС данного типа применима к сельскохозяйственным приложениям, состоящим из стационарных полевых датчиков, мобильных фермерских установок и СУ для контроля перемещения скота. Сюда можно отнести сети V2X, где часть СУ интегрирована с транспортными средствами, часть с придорожной инфраструктурой, системы мониторинга состояния пациентов в госпитале, комбинированные сенсорные и робототехнические сети и т. д.

Топология БСС описывается ориентированным графом, вершинам которого соответствуют сетевые узлы, а ребрам допустимые каналы связи между узлами. Обычно рассматривают следующие варианты топологий:

— „звезда“ — имеется один центральный узел (базовая станция, головной узел, edge gateway), который может взаимодействовать с некоторым набором других узлов, при этом эти узлы не могут передавать сообщения друг другу непосредственно;

— „ячеистая сеть“ — позволяет передавать данные от одного узла (сенсора) к любому другому, находящемуся в радиусе действия радиопередатчика;

— „кластерная“ — состоит из взаимодействующих между собой кластеров, каждый из которых в свою очередь имеет выделенный узел (головной узел, узел-маршрутизатор, gateway) кластера, через который передают и получают данные остальные узлы, отнесенные к данному кластеру;

— „смешанная“ — состоит из взаимодействующих подсетей вышеобозначенных топологий.

В зависимости от используемых в БСС типов СУ и связанных с ними устройств архитектуры разделяются на однородные и неоднородные. В однородной архитектуре все СУ одного типа, а в неоднородной — присутствуют различные типы сенсорных узлов и устройств, которые различаются вычислительной мощностью, памятью, характеристиками приемопередатчиков и др.

Передача информации в БСС может быть однонаправленной или двунаправленной. Однонаправленная связь означает, что поток данных может идти только от СУ к стоку. Двунаправленная связь более эффективна, позволяет отправлять в СУ управляющие данные из стока (например, изменение топологии и рабочего цикла, характер требуемой от СУ информации, распределение слотов и пути маршрутизации). Но ее реализация требует удорожания оборудования сетевого узла и усложнения протоколов. Тем не менее, в последнее время однонаправленная связь не распространена в приложениях БСС [4].

Важным параметром СУ служит источник питания и потребление энергии, поскольку сама концепция БСС во многом предполагает автономную работу СУ. В реальных БСС используются как восполняемые, так и невосполняемые источники энергии. Однако в настоящее время предпочтение отдается первому подходу [5]. СУ оснащаются средствами получения „зеленой“ энергии из окружающей среды (солнечной, термальной, ветренной, вибрации и т. д.). Также используются беспроводные способы передачи энергии [6]. Очевидно, что потребление энергии СУ зависит от режима (регистрация, прием или передача информации, ждущий или спящий режим, подзарядка, мониторинг). Фактор энергопотребления существенным образом влияет на надежность и жизненный цикл БСС, учитывается при реализации топологий и функционировании сетевых протоколов. Для подробной информации об архитектуре и протоколах БСС рекомендуем монографии [7], [8].

В БСС задача обеспечения качества обслуживания (quality of service, QoS) является актуальной и в настоящее время [9]–[11]. Подход к обеспечению QoS разделяют на индивидуальный и коллективный [9]. Индивидуальный подход предполагает конкретные требования к качеству СУ, их размещению, количеству активных сенсоров и т. д. При коллективном подходе качество функционирования отдельных сенсоров неважно, имеет значение лишь производительность всей системы, высокая достоверность информации агрегированной стоком и т. п. С перспективы обеспечения QoS приложений БСС можно выделить четыре класса:

— Событийно-ориентированные приложения — приложения, где используется данный метод, интерактивные, выполняются в реальном времени, чувствительны к задержкам. Эффективность функционирования приложения существенно зависит от сенсоров, обнаруживающих события. Данные, передаваемые сенсорами, обладают высокой избыточностью, сильно коррелируют и даже дублируют друг друга. Интенсивность трафика, генерируемого отдельным СУ, может быть очень низкой, однако при этом возможны резкие всплески. Отклик на обнаруженное событие должен быть доведен до сенсоров и актуаторов системы с высокой гарантией как можно быстрее.

— Приложения, ориентированные на запросы — во многом обладают признаками предыдущего класса, обладая следующим принципиальным отличием: информационные потоки идут от стока к СУ (директивы обновить ПО, сменить длительность фаз рабочего цикла и т. д.), в то время как в событийно-ориентированных приложениях источником данных являются СУ, данные передаются в сток. Также приложения могут допускать задержку в рамках ограничений, формируемых конкретным запросом.

— Непрерывная передача — СУ отправляют свои данные непрерывно в заранее заданном темпе. Для данного класса характерно сосуществование разных типов трафика. Соответственно, требуется дифференцирование качества обслуживания, формирование и обеспечение различных требований к QoS. Некоторые приложения данного класса, выполняемые в реальном времени (real time), чувствительны к задержке и потерям пакетов (голос, видео), с другой стороны, для некоторых приложений задержка и потеря пакетов не критична (non real time, NRT).

— Приложения, управляемые временем (time-driven applications) — в данных БСС сенсорные узлы периодически собирают и передают данные мониторинга физической среды. Период между двумя последовательными пакетами данных от конкретного узла датчика называется частотой дискретизации данных. В основном в данных БСС узлы сообщают данные и выполняют минимальную их обработку. Основная работа по обработке данных выполняется стоком, базовой станцией (либо иным специализированным вычислительным узлом).

Таким образом, как показывает выше изложенное описание многообразия БСС, при проектировании и анализе БСС для конкретных приложений необходимо учитывать огромное количество факторов: состав, структуру и топологию; типы используемых СУ, их параметры и функциональность; режимы генерирования трафика сообщениями сенсорными узлами (заданная регулярная периодичность регистрации и передачи данных, регистрация по запросу, случайный регламент); требования к надежности системы и показатели QoS. Отсюда следуют определенные требования к используемым математическим и программным средствам оценки эффективности БСС.

Поскольку современные БСС обладают высокой динамикой, для БСС характерно некоторое дискретное множество состояний со случайными переходами между ними, одним из перспективных инструментов являются Марковский процесс принятия решений (Markov decision processes, MDP) и его модификации: частично наблюдаемый Марковский процесс принятия решений (partially observable Markov decision process, POMDP), иерархический Марковский процесс принятия решений (hierarchical Markov decision process, HMDP). Данные средства обеспечивают гибкость, необходимую для соответствия различным условиям в приложениях БСС. Например, использование мобильного шлюза для сбора данных сопряжено со многими проблемами проектирования. Здесь основанный на MDP метод может использоваться для анализа временной корреляции движущихся объектов и предсказания их будущего местоположения [12]. Кроме того, сенсоры обычно предоставляют искаженные показания, что затрудняет процесс принятия решений. В такой ситуации, при работе с неточными наблюдениями POMDP хорошо себя показал [13]. Однако неотъемлемой проблемой MDP является размерность пространства состояний и / или пространства действий. В настоящее время не представляется возможным напрямую применять метод MDP в реальных задачах (тем более его модификации) [14]. Вместо этого обычно используются приближенные решения, что снижает достоверность оценок эффективности БСС. Кроме того, предполагается, что вероятности перехода в MDP и функция вознаграждения не зависят от времени. Тем не менее, в некоторых системах это предположение может быть неосуществимым. Использование нестационарных переходных вероятностей в методах MDP значительно повышает их трудоемкость.

Основными средствами анализа БСС остаются математическое моделирование с использованием Марковских процессов и имитационное моделирование [15–19]. В следующих разделах предлагается обсуждение и развитие данных средств.

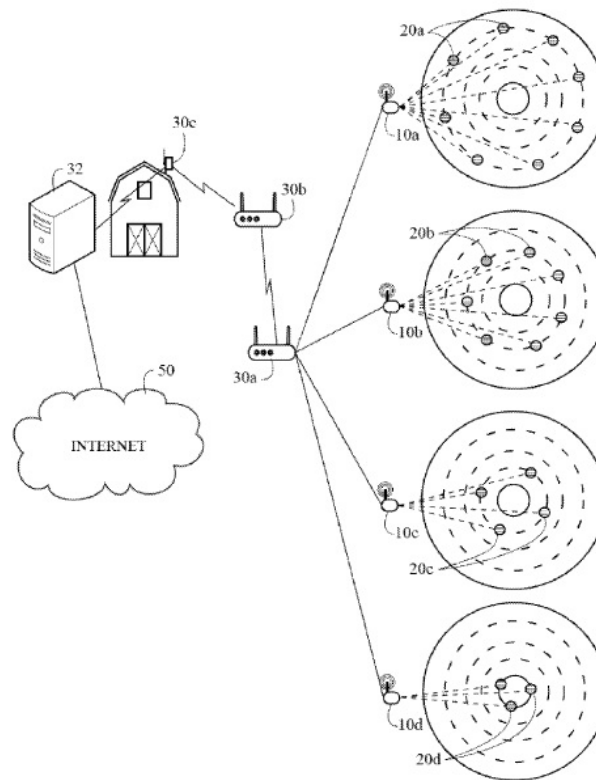


Рис. 1. Топология типовой сенсорной сети, используемой для мониторинга

2. Математическое моделирование БСС. Основанные на Марковских процессах модели широко используются для анализа и оценки эффективности как отдельных элементов БСС, так и всей системы в целом. При этом зачастую специфика топологии сети не принимается во внимание. С другой стороны, в ряде исследований сделан фокус на оптимизацию топологии сети, при этом характеристики ее элементов, например, вероятности работоспособности узлов, считаются заданными. Подход, сочетающий в себе учет топологии сети, детали функционирования ее узлов, качество каналов, изложен в статье [20] в виде общей идеи. Здесь мы покажем его конкретизацию на отдельной задаче и приведем пример, когда оптимальной топологии, в общем случае, не существует.

Исследуя важные характеристики сети, необходимо принимать во внимание ее топологию [21]. Рассмотрим топологию специального вида, типовую для сетей, применяемых в цифровом сельском хозяйстве, при охране периметра распределенных объектов, LoRaWAN, приложений, реализованных с использованием концепции Edge Computing и т. п. На рис. 1 представлена данная топология, взятая из патента [22].

Обычно БСС с учетом топологии моделируется случайным графом, для которого вычисляется полином надежности [23], т. е. вероятность связности графа. Для вычисления полинома надежности используется метод факторизации [24], [25]. В общем случае задача получения полинома надежности случайного графа является NP-трудной, однако для частных топологий метод факторизации позволяет получить решение в аналитическом виде.

Для указанной БСС необходим модифицированный критерий эффективности, так как в данном случае для успешной работы требуется не только связность сети, но и успешное обнаружение события.

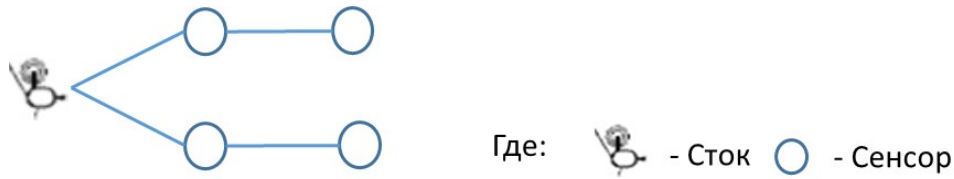


Рис. 2. Пример топологии сети с одним стоком

Предполагается, что при обнаружении события действует правило $n-k$: если из n сенсоров не менее k доступны, то событие обнаружено. Сенсор доступен с вероятностью q , где q можно вычислить с использованием моделей на основе Марковских процессов.

Пусть полином надежности для топологии сети будет $R(p)$, где параметр p характеризует качество каналов. Тогда надежность системы определяется как произведение вероятности связности топологии транзитных узлов и вероятности обнаружения события.

$$P_R = R(q) \sum_{j=k}^n C_j^n q^j (1-q)^{n-j}. \quad (1)$$

Предложенный критерий предлагается использовать для сравнительного анализа методов повышения надежности БСС.

Теперь рассмотрим пример простой топологии (рис. 2). В данной сети два кластера, в которых идет обнаружение события. В каждом кластере имеется один сенсор. У каждого кластера есть свой посредник на пути к стоку (базовая станция), узлы считаем абсолютно надежными. Канал работоспособен с вероятностью p .

Полином надежности для данной сети:

$$P = p^4. \quad (2)$$

Для улучшения надежности сети используем два метода:

1. Оснащение сенсоров (оконечных узлов) дополнительными средствами, позволяющими усилить мощность передаваемого сигнала, без деградации надежности СУ из-за повышенного энергопотребления. Например, можно оснастить СУ средствами получения энергии из окружающей среды. В данном случае надежность канала увеличивается в „ a “ раз ($a > 1$, но $pa \leq 1$). Топология остается той же. Следовательно, согласно формуле (2), надежность сети становится

$$P = a^4 p^4. \quad (3)$$

2. Множественный сток. Сеть разделяется на два кластера, в каждом имеется свой сток. Получается новая топология (рис. 3), при этом вероятность доступности каналов остается прежней.

В данном случае с помощью формулы (3) получается следующая надежность сети:

$$P = p^2. \quad (4)$$

Очевидно, оба способа улучшают надежность сети. Однако нельзя сказать, какой из способов является лучшим в общем случае, это зависит от того, какими будут вероятности доступности сенсоров и их начальные характеристики. Например, первый способ лучше, если

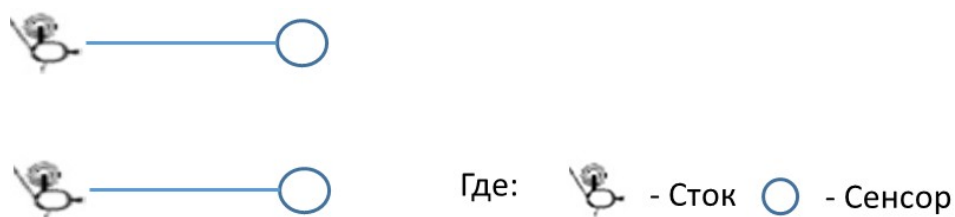


Рис. 3. Пример топологии с двумя стоками

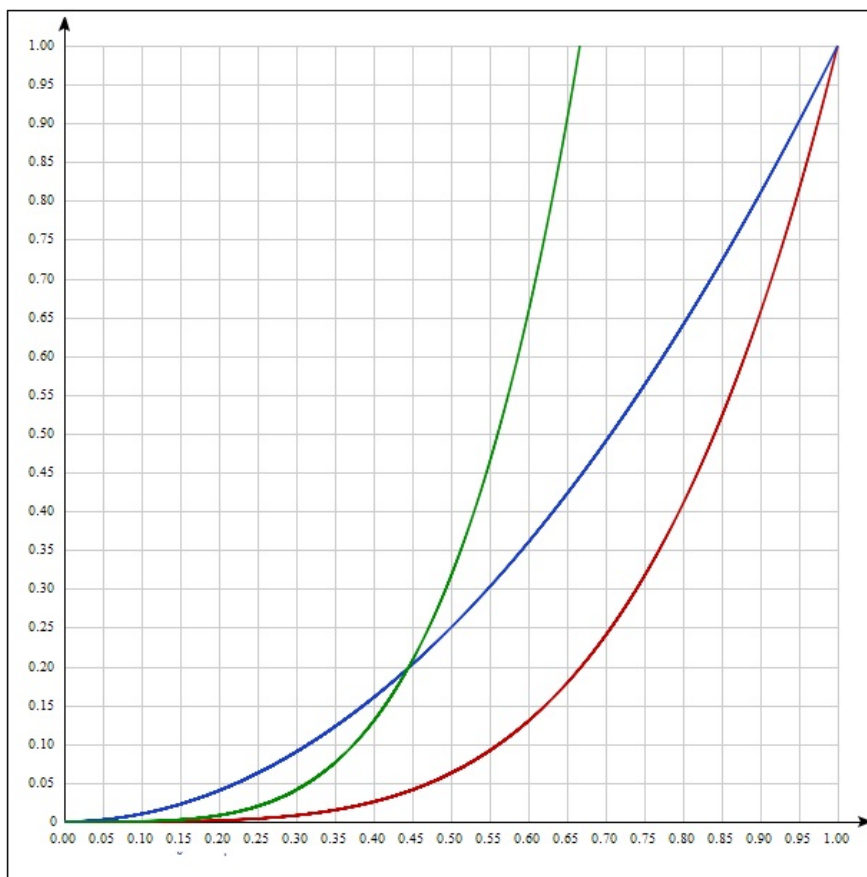


Рис. 4. Зависимость надежности системы (ось ординат) от вероятности работоспособности канала (ось абсцисс) для разных сценариев

$$P > \frac{1}{a^2} \tag{5}$$

На рис. 4. приведены графики надежности сети при условии, что $a = 1,5$. Зеленым выделен график для надежности сети, рассчитанной по формуле (3), синий график для надежности по формуле (4), красный график построен для начальной надежности сети (2).

3. Моделирование БСС с использованием сетей Петри. В данном разделе представлена разработка модели функционирования БСС в виде временных цветных (раскрашенных) сетей Петри, типового инструментария для оценки эффективности промышленных систем [26], а также апробация применения предложенных моделей на приме-

ре анализа вариантов типовой топологий БСС. Достоинства сетей Петри заключаются в том, что они позволяют моделировать самые разные дискретные динамические системы с учетом вероятных конфликтов между ними, обладают наглядностью и обеспечивают возможность автоматизированного анализа, позволяют переходить от одного уровня детализации описания системы к другому.

Для оценки качества приложения проектного варианта БСС используются следующие параметры:

- сообщения, доставленные на базовую станцию с опозданием относительно запланированных „дат“;
- среднее время доставки сообщений из числа доставленных на базовую станцию с опозданием относительно запланированных „дат“;
- максимальное время доставки сообщений на базовую станцию из числа доставленных с опозданием относительно запланированных „дат“;
- сообщения, доставленные на базовую станцию с опережением относительно запланированных „дат“;
- среднее время доставки сообщений из числа доставленных на базовую станцию с опережением относительно запланированных „дат“;
- максимальное время доставки сообщений на базовую станцию из числа доставленных с опозданием относительно запланированных „дат“;
- среднее время доставки сообщений из числа всех доставленных на базовую станцию;
- максимальное время доставки сообщений на базовую станцию.

Обозначенные параметры рассматриваются в % и количественном выражении по отдельным СУ-регистраторам и их группам (кластерам), в целом по БСС.

Предложенные средства позволяют получить информационный трафик анализируемого варианта БСС на рассматриваемом отрезке времени, на основе которого можно получить обозначенные параметры.

3.1. *Спецификация БСС в виде дискретной динамической системы.* Дискретная динамическая система (ДДС) задается [27]:

- вектором состояния, принадлежащим заданному фазовому пространству (иначе — дискретному пространству всех допустимых состояний), координаты которого определяют состояние системы в любой момент времени;
- множеством правил (функций, алгоритмов и т. д.), по которым изменяется состояние системы во времени.

Конструкция пространства допустимых состояний ДДС может быть определена на основе множеств:

- элементов системы, которое в свою очередь структурировано в виде классов и подклассов с учетом типизации элементов;
- структурных взаимосвязей между элементами системы;
- параметров и характеристик (с соответствующими областями значений) для элементов системы, классов и их подклассов, а также структурных взаимосвязей между ними.

В качестве примера для спецификации в виде ДДС взят класс БСС: стационарная архитектура и различные топологии, пассивные и активные сенсоры с различной функциональностью.

ДДС — дискретная динамическая система „беспроводная сенсорная сеть“, процесс функционирования которой рассматривается в дискретном „календаре“ времени $T = \{\tau | \tau = 0, 1, 2, \dots, \tau^*\}$.

В рассматриваемом варианте спецификации ДДС включает следующие классы (подмножества) элементов:

– $N = \{n | n = 1, 2, \dots\}$ – СУ (сенсорные узлы/ сенсоры);

– $\{(n, k), n \in N^0, k = 1, \dots, k(n)\}$ – информационные сообщения, регистрируемые в БСС в узлах $n \in N^0 < N$ и доставляемые через допустимые каналы связи до базовой станции; k -локальный номер регистрируемого в узле $n < N_0$ сообщения;

– e – энергия.

В классе N элементов СУ выделяем следующие подклассы:

– n^* – базовая станция;

– N^0 – СУ регистраторы;

– N_1 – СУ маршрутизаторы;

– N_2 – СУ головные узлы кластеров (мобильные, локальные стоки);

– N_3 – многофункциональные (гибридные) узлы;

– N^e – СУ с пополняемым ограниченным запасом энергии (емкостью источников питания).

Граф $GN = \{g = (n, n1) | n, n1 \in N\}$ задает/определяет совокупность допустимых каналов связи между узлами БСС, т.е. задает топологию БСС.

Обозначим $G(n)$ множество допустимых маршрутов (путь в графе без циклов) от узла n до базовой станции n^* зарегистрированного сообщения $m = (n, k)$, $n \in N^0$; т.е. $G(n) = \{gn = (n, n1, n2 \dots n^*) | (ni, ni+1) \in GN, ni = nj, \text{ если } i=j\}$.

В данной работе СУ будем рассматривать на уровне трех функциональных блоков: регистрации и обработки информации (формирования и хранения информационного сообщения); приема-передачи информационных сообщений; источник питания.

В рамках такого набора функциональности состав допустимых состояний следующий:

– свободен, готов к работе;

– занят хранением зарегистрированного/принятого информационного сообщения и ожиданием передачи;

– занят.

Введем следующие параметры и характеристики, используемые при спецификации рассматриваемых БСС:

– $\{\tau_{nk}^*\}$ – „даты“ регистрации сообщений $m = (n, k)$ узлом $n \in N^0$ в „календаре“ времени T ;

– $\{\tau_{nk}\}$ – планируемые „даты“ доставки сообщений (n, k) , $n \in N^0$ на базовую станцию n^* в „календаре“ времени T ;

– $A = (a_{ij}^n)$, где:

– a_{nn}^n – длительность процесса регистрации информации СУ $n \in N^0$ и подготовки сообщения к отправке далее по маршруту доставки;

– a_{nj}^n – длительность процесса передачи сообщения от СУ $n \in N^0$ к другому СУ j , $(n, j) \in gn$, $gn \in G(n)$;

– a_{ij}^n – длительность процесса передачи сообщения от СУ $i \in N^0$ к другому СУ j , $(i, j) \in gn$, $gn \in G(n)$;

– $B = (b_{ij}^n)$, где $b_{ij}^n = 1$ если $(i, j) \in gn$, $gn \in G(n)$, в противном случае $b_{ij}^n = 0$;

– x_i^{nk} – „дата“ начала обработки сообщения (n, k) СУ i (если $i=n$ – это „дата“ начала регистрации сообщения (n, k) СУ i , если i не равно n , т.е. СУ i является маршрутизатором для сообщения (n, k) – это „дата“ начала приема сообщения СУ i);

- v_i^{nk} — „дата“ завершения обработки сообщения (n, k) СУ i (т. е. окончание передачи сообщения далее по маршруту доставки на БС);
- z_i^{nk} — „дата“ начала передачи сообщения (n, k) СУ i далее по маршруту доставки на БС;
- $C = \binom{n}{i}$, где $\binom{n}{i}$ — затраты энергии СУ i на обработку (регистрация\прием + хранение + передача далее по маршруту доставки) сообщения, регистрируемого СУ n ;
- τ_e^n — время, необходимое для пополнения запаса энергии СУ n ;
- (n, k, τ) — текущее состояние сообщения (n, k) в момент времени τ , характеризующее (описываемое) номером СУ, на котором обрабатывается или завершена обработка сообщения (сообщение ожидает следующую по маршруту операции передачи), собственно самим временем завершения последней выполненной\выполняемой операцией над сообщением, а также, возможно, дополнительными параметрами, характеризующими сообщения с учетом специфики приложения БСС;
- $gs(n, \tau)$ — текущее состояние СУ $n \in N$ в момент времени τ (например, для СУ с пополняемым запасом энергии это состояние может описываться двумя параметрами: номером состояния и текущим запасом энергии);
- $St(WSN) = s(m, \tau); gs(n, \tau) | n \in N, m \in M$ — состояние в момент времени τ БСС;
- $f : S_\tau(WSN) > S_{\tau+1}(WSN)$, функция перехода БСС из состояния в момент времени τ в состояние $(\tau + 1)$; где функция f порождается набором локальных функций/-предикатов, которые описывают (определяют) правила/алгоритмы согласованной смены состояний сообщений и СУ в текущей ситуации $S_\tau(WSN)$.
- $Tr(WSN, T) = \{S1(WSN), S2(WSN), \dots, S_\tau(WSN), ST(WSN)\}$ — траектория функционирования WSN на интервале $\tau \in [0, T]$.

Траектория функционирования БСС на интервале $[0, \tau^*]$ порождает два согласованных и взаимосвязанных расписания:

- $Sch(M, Tr(WSN, T)) = \{Sch_{nk}, Tr | Sch_{nk}, Tr = \{(x_i^{nk}; z_i^{nk}; v_i^{nk}) | i \in gn_k; n \in N_0, k=1, \dots, k(n)\}\}$ — расписание доставки сообщений от места регистрации до базовой станции;
- $Sch_0(N, Tr(WSN, T)) = \{Sch_{m, Tr}^0 | n \in N\}$ — расписание допустимых состояний СУ $n \in N$.

Ниже сформулированы ограничения, технологические условия, которые учитываются при формировании допустимой траектории функционирования:

- сообщение (n, k) может быть обработано узлом i только после завершения его обработки предыдущим СУ l , $(l, i) \in gn G(n)$, $n \in N_0$ (т. е. в соответствии с одним из допустимых маршрутов его доставки к базовой станции);
- в период передачи сообщения (n, k) от одного СУ другому в занятом состоянии находятся оба СУ (передающий и принимающий);
- СУ в каждый момент времени может обрабатывать только одно сообщение;
- СУ в каждый момент времени может быть в одном из допустимых состояний (занят обработкой сообщения; свободен; занят в процессе зарядки энергией);
- для энергетически зависимых СУ сообщение может начать обрабатываться только при условии наличия необходимого для его полной обработки запаса энергии;
- возможность связаться одному СУ с другим СУ определяется топологией БСС (графом GN , порождаемым множеством допустимых маршрутов $G(n)$, $n \in N_0$).

Для энергетически зависимых узлов с возможностью пополнения запаса энергии заданы режимы пополнения.

3.2. *Сети Петри как инструмент спецификации и моделирования рассматриваемого класса БСС.* Сеть Петри — двудольный ориентированный мультиграф, в котором два типа вершин: „позиции“ и „переходы“ (первые графически обозначаются кружками, вторые — прямоугольниками или вертикальными планками).

Внутри позиций размещаются маркеры (метки, фишки); для каждого перехода определены множества входных и выходных дуг (в общем случае, дуги могут быть кратными), связывающих его с соответствующими позициями. Переходы при определенных условиях могут срабатывать, изменяя распределение маркеров по позициям (маркировка сети).

При моделировании простых систем достаточно возможностей ординарных (классических) сетей Петри, для более сложных используют различные варианты обобщения, модификации (цветные/раскрашенные сети Петри, временные, стохастические и т. д.).

Для спецификации и моделирования рассматриваемого класса БСС в данной работе предлагается использовать раскрашенные временные сети Петри (CPN) и программный продукт CPN Tools с языком программирования CPN ML. Перейдем к формальным определениям, придерживаясь терминологии [28].

Определение 1. Сетью Петри называется набор $PN = \langle P, T, E, f, \mu \rangle$ (ординарная или классическая сеть Петри), где:

- $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ — множество позиций;
- $T = \{t_1, \dots, t_n\}$ — множество переходов, такое, что $P \cap T = \emptyset$;
- $E \subseteq P \times T \cup T \times P$ — конечное множество дуг типа $e = (p, t)$ или $e = (t, p)$;
- $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ — маркировка сети, где $\mu_i = \mu(p_i)$ — число маркеров в i -позиции, а μ^0 — начальная маркировка, которая определяет число маркеров, размещенных в соответствующих позициях в исходном состоянии сети Петри, т. е. $\mu^0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$;
- $f: \mu^u > \mu^{u+1}$ — функция перехода сети из маркировки u в маркировку $(u+1)$, которая определяется условиями срабатывания перехода (т. е. наличием необходимого числа маркеров во входных позициях для данного перехода) и правилами его срабатывания, в результате которого маркеры в заданных соотношениях перемещаются из входных позиций в выходные для данного перехода;
- $\{\mu^1, \mu^2, \dots, \mu^u, \mu^{u+1}, \dots\}$ — допустимая последовательность маркировок, получаемая в процессе последовательного срабатывания переходов сети.

Дополнительно обозначим:

- $Ip(t) = \{p | (p, t) \in E\}$ — множество входных позиций для перехода t ;
- $Op(t) = \{p | (t, p) \in E\}$ — множество выходных позиций для перехода t ;
- $In(p) = \{t | (t, p) \in E\}$ — множество входных переходов для позиции p ;
- $On(p) = \{t | (p, t) \in E\}$ — множество выходных переходов для позиции p .

Отметим, что при необходимости, чтобы не вводить дополнительные обозначения, приведенные выше обозначения могут быть использованы для обозначения входных и выходных дуг для позиций и переходов соответственно.

Поскольку для спецификации и моделирования рассматриваемого класса БСС предлагается использовать раскрашенные временные сети Петри (CPN) и программный продукт CPN Tools с языком программирования CPN ML, приведем определение данного варианта обобщения.

Определение 2. Раскрашенную сеть Петри определим как следующий набор $CPN = (PN, \Sigma, V, C, G, EF)$, где:

- PN — ординарная сеть Петри (определение 1);

- Σ — конечное множество непустых цветовых множеств (в CPN ML они определены как мультимножества [28], мультимножество — это обычное множество, в котором объекты могут входить несколько раз);
- V — конечное множество переменных, $\text{Type}[v] \in \Sigma, v \in V$;
- $C: P \rightarrow \Sigma$ — это функция, которая назначает набор цветов для позиции $C(p) = \Sigma p \in \Sigma, \tau p \in P$;
- $G: T \rightarrow EXPRV$ — функция охраны, которая позволяет переходу выполняться только при соблюдении дополнительных условий, $\text{Type}[G(t)] = \text{Bool} \tau \text{Type}[Var(G(t))]$;
- $EF: E \rightarrow EXPRV$ — это функция, которая назначает выражение для каждой дуги $e \in E$, при этом $\text{Type}[EF(e)] = C(p) \Sigma$, где p — позиция, связанная с дугой e (т.е. $e = (p, t)$ или $e = (t, p)$);
- $In: P \rightarrow EXPR_0$ — функция, которая присваивает выражение каждой позиции $p \in P$ при начальной маркировке, так что $\text{Type}[In(p)] = C(p) \Sigma$;
- $\mu_i = \{C_i(p) \Sigma | \forall p \in P\}$ — маркировка i сети;
- $f: \mu_u \rightarrow \mu_{u+1}$ — функция перехода сети из маркировки u в маркировку $(u+1)$, которая определяется условиями срабатывания переходов декларируемыми функциями C, G, EF, In .

Здесь использованы следующие обозначения:

- $C(p) \Sigma$ — конкретное цветовое множество (мультимножество) из Σ ;
- $EXPRV$ — множество выражений (предикатов), которые определены на множестве типов переменных V ;
- $\text{Type}[x]$ — значение выражения $x \in EXPRV$;
- $\text{Var}[x]$ — множество свободных переменных в выражении x ,
- $\text{Type}[v]$ — значение переменной $v \in V$.

Отметим, что, согласно [28], над мультимножествами определены операции сложения, скалярного умножения, сравнения, определения мощности и вычитания, которые используются при спецификации и реализации выражений $EXPRV$ при моделировании CPN.

Содержательно, обобщение понятия ординарных сетей Петри до раскрашенных происходит за счет введения понятия „цветовых множеств“, представленных в виде мультимножеств, на основе которых задаются:

- функция цвета, которая определяет допустимое множество цветов маркеров для каждой из позиций;
- функция охраны перехода, которая позволяет переходу выполняться только при соблюдении заданных дополнительных условий;
- функция выражений дуг, которая вместо кратности дуг сети в соответствие ставит некоторое заданное выражение (данное выражение определяет правило\алгоритм перемещения маркеров при выполнении перехода);
- функция начальной маркировки, при реализации которой, в отличие от случая ординарной сети Петри, каждой позиции ставится в соответствие не только количество маркеров, но и значение своего цветового множества.

Определение 3. Временную раскрашенную сеть Петри определим как набор $CPNT = (CPN, \text{Time})$, где CPN — определенная выше раскрашенная сеть Петри, а $\text{Time}: \tau \rightarrow \text{Interv}(N_+)$ — функция временных интервалов, где

$$\text{Interv}(N_+) = \{[\tau_i, \tau_{i+1}] | \tau_i \leq \tau_{i+1}, \tau_i \in N_+, i = 1, 2, 3, \dots\}.$$

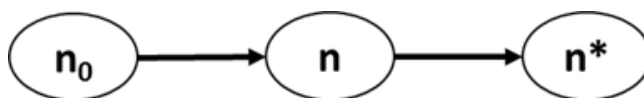


Рис. 5. Пример БСС из трех узлов

Границы временного интервала трактуются как время начала и завершения срабатывания перехода раскрашенной сети Петри.

В CPNT текущая маркировка сети в момент времени τ_i обозначается $\mu(\tau_i)$, а $\{\mu(\tau_0), \mu(\tau_1), \dots, \mu(\tau_i), \mu(\tau_{i+1}), \dots\}$ — допустимая последовательность маркировок, получаемая в процессе последовательного срабатывания переходов сети CPNT.

С точки зрения представления дискретной динамической системы в виде CPNT (временная раскрашенная сеть Петри) маркеры можно интерпретировать как элементы ДДС, переходы — процессы (события), позиции — состояния элементов системы (т.е. маркер в конкретной позиции — это элемент системы, который находится в соответствующем состоянии), маркировка сети — состояние системы. Изменение маркировки сети Петри (смена состояния системы) определяется условиями „срабатывания“ переходов (наличия маркеров заданных характеристик в сопряженных с ним позициях) и правилами их „срабатывания“.

Условия „срабатывания“ переходов формулируются в виде EXPRV для функций G, а правила „срабатывания“ переходов в виде EXPRV для функций EF на входных $I_p(t)$ и выходных $O_p(t)$ дугах перехода $t \in T$.

Допустимая последовательность маркировок сети Петри $\mu = \{\mu(\tau_0), \mu(\tau_1), \dots, \mu(\tau_i), \mu(\tau_{i+1}), \dots\}$ соответствует траектории функционирования ДДС на некотором заданном временном интервале, которая описывается двумя согласованными и взаимосвязанными расписаниями:

— $Sch(M, Tr(WSN, T)) = \{Sch_{m, Tr} | Sch_{m, Tr} = \{(\tau_{m,n}^1; \tau_{m,n}^2) | n \in G(m) = \{gm = (n_0, n_1, n_2 \dots n^*)\}; m \in M\}$ — расписание доставки сообщений от места регистрации до базовой станции;

— $Sch_0(N, Tr(WSN, T)) = \{Sch_{m, Tr}^0 | n \in N\}$ — расписание допустимых состояний СУ $n \in N$.

Представление полученной в результате численного моделирования на временном интервале $[0, T]$ допустимой последовательности маркировок сети Петри μ в виде обозначенных выше расписаний позволяет рассчитать сформулированные выше параметры оценки качества БСС.

С учетом данного варианта интерпретации основных понятий CPNT, приведем варианты представления для типовых топологий БСС в виде CPN, которые описывают логику функционирования БСС.

Вариант 1. БСС состоит из трех сенсорных узлов (рис. 5):

- n_0 — регистрирует информационное сообщение, передает на следующий СУ n ;
- n — выполняет функции маршрутизатора: принимает сообщение от n_0 и доставляет на n^* ;
- n^* — базовая станция.

Для данного варианта БСС на рассматриваемом интервале времени нет ограничения для запаса энергии, его достаточно для работы СУ. Топология сети Петри для данного варианта имеет следующий вид (рис. 6):

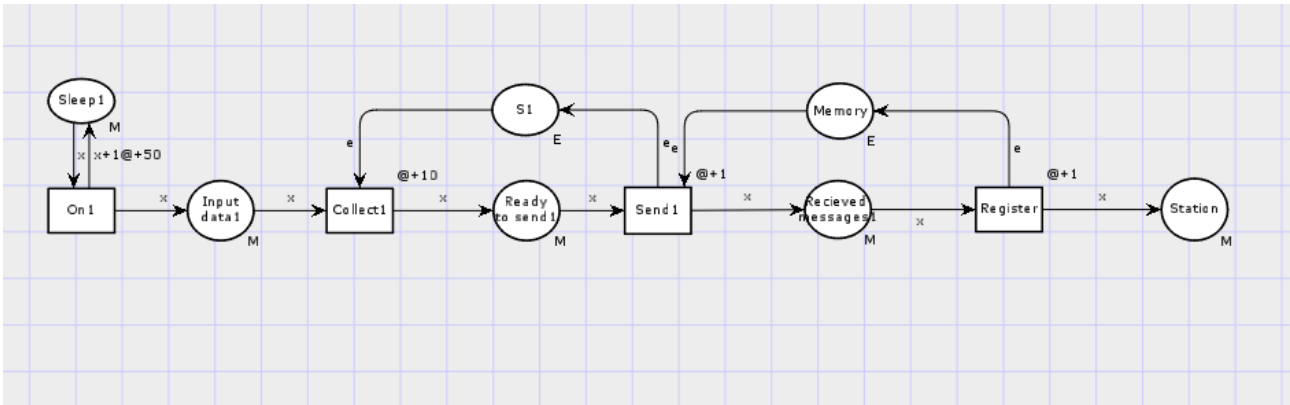


Рис. 6. Сеть Петри варианта 1

В данном варианте сети Петри позиции и переходы имеют следующие функциональные назначения.

Позиции:

- Sleep 1 — позиция, в которой СУ находится в спящем состоянии;
- Input data — позиция, в которой маркер идентифицирует состояние информационных сообщений: ожидает регистрации СУ n_0 ;
- Ready to send 1 — позиция, в которой маркер идентифицирует состояние информационных сообщений: зарегистрировано СУ n_0 и ожидает передачи на СУ-маршрутизатор n ;
- Received messages — позиция, в которой маркер идентифицирует состояние информационных сообщений $m = (n_0, k)$, принятых СУ n и ожидающих в памяти n передачи на базовую станцию n^* ;
- Station — позиция, в которой маркер идентифицирует состояние информационных сообщений $m = (n_0, k)$, принятых на базовую станцию n^* и помещенных в БД БСС;
- S1 — позиция, в которой наличие маркера идентифицирует состояние готовности выполнения СУ n_0 своих функций;
- Memory — позиция, в которой наличие маркера идентифицирует состояние готовности выполнения СУ n своих функций (приема-передачи сообщений);

Переходы:

- On 1 — переход, который реализует процесс „пробуждения“ СУ n_0 ;
- Collect 1 — переход, который реализует процесс регистрации информации СУ n_0 и готовит сообщение $m = (n_0, k)$ к передаче на СУ n ;
- Send 1 — переход, который реализует процесс приема-передачи сообщения $m = (n_0, k)$ от СУ n_0 к СУ n ;
- Register — переход, который реализует процесс приема-передачи сообщения $m = (n_0, k)$ от СУ n базовой станции n^* с выполнением последней функций загрузки в БД БСС.

Вариант 2. Данный вариант БСС является обобщением варианта 1 за счет того, что СУ n_0 и n с ограниченным, но пополняемым запасом энергии (подзарядка источников питания СУ). Для реализации процесса пополнения запаса их энергии введены переходы Charging 1 и Charging 2, а также позиции Energy state 1, Energy state 2.

Сеть Петри для данного варианта представлена на рис. 7:

Вариант 3. БСС состоит из пяти сенсорных узлов (рис. 8):

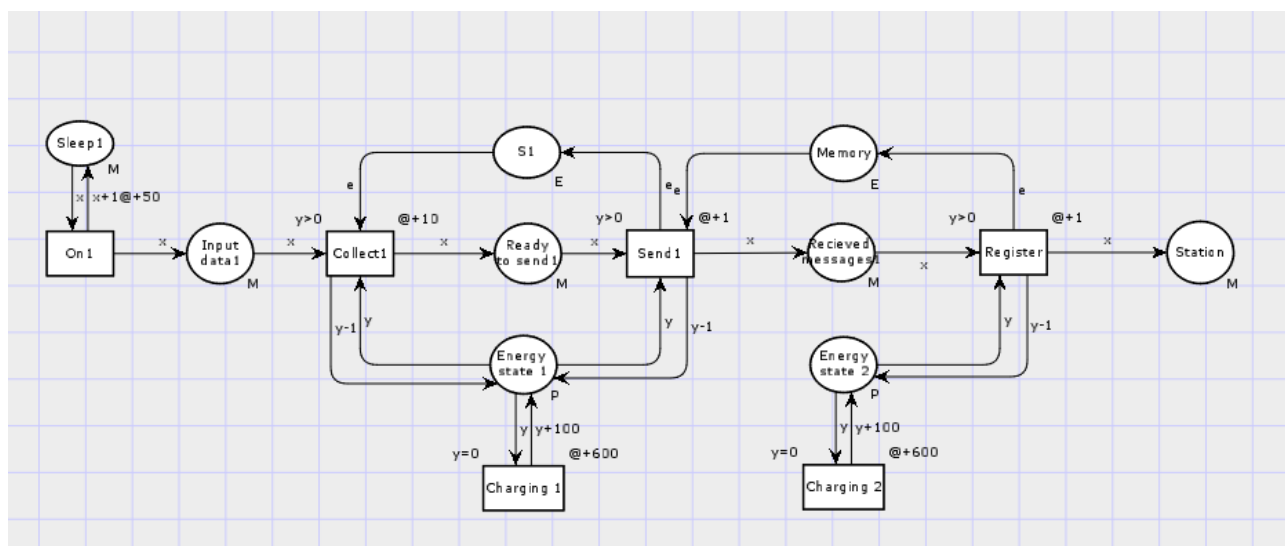


Рис. 7. Сеть Петри варианта 2

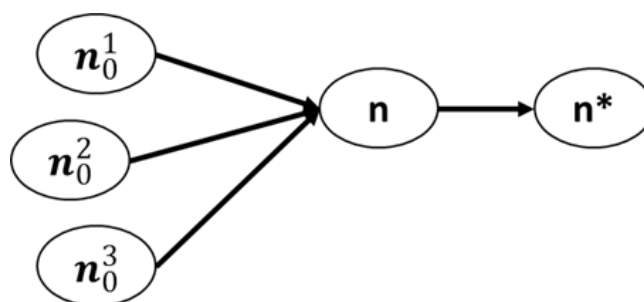


Рис. 8. Топология варианта 3

- n_0^1, n_0^2, n_0^3 — регистрирует информационное сообщение, передает на следующий СУ n ;
- n — выполняет функции маршрутизатора: принимает сообщение от n_0^i и доставляет на n^* ;
- n^* — базовая станция.

Все СУ предполагаются с неограниченным запасом энергии.

В данном варианте сети Петри (рис. 9) позиции и переходы имеют следующие функциональные назначения.

Позиции:

- Sleep 1, Sleep 2, Sleep 3 — позиции, в которых СУ находятся в спящем состоянии;
- Input data 1, Input data 2, Input data 3 — позиции, в которых маркер идентифицирует состояние информационных сообщений: ожидают регистрации СУ $n_0^i \in N_0$;
- Ready to send 1, Ready to send 2, Ready to send 3 — позиции, в которых маркер идентифицирует состояние информационных сообщений: зарегистрированных СУ $n_0^i \in N_0$ и ожидающих передачи на СУ-маршрутизаторы $n \in N$;
- Received messages — позиция, в которой маркер идентифицирует состояние информационных сообщений $m = (n_0, k)$, принятых СУ $n \in N$ и ожидающих в памяти n передачи на базовую станцию n^* ;
- Station — позиция, в которой маркер идентифицирует состояние информационных сообщений $m = (n_0, k)$, принятых на базовую станцию n^* и помещенных в БД БСС;

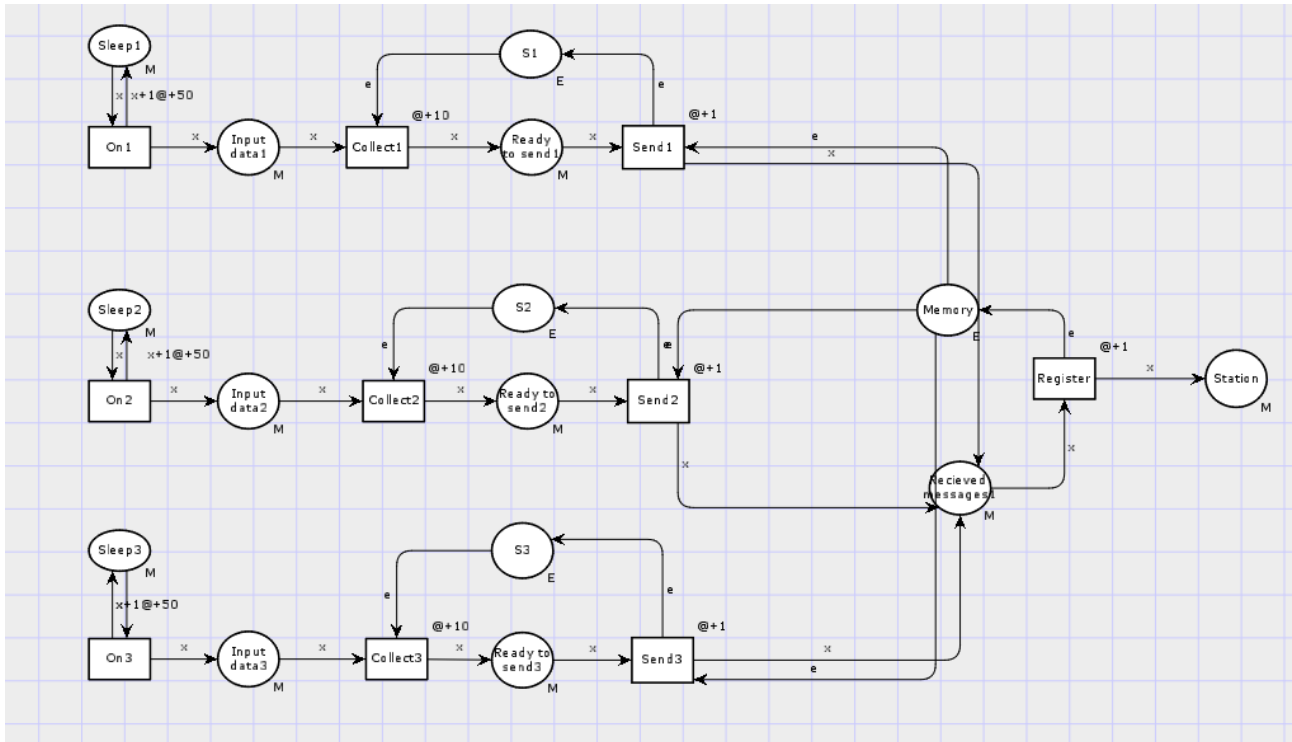


Рис. 9. Сеть Петри варианта 3

— $S1, S2, S3$ — позиции, в которых наличие маркера идентифицирует состояние готовности выполнения СУ $n_0^i \in N0$ своих функций;

— $Memory$ — позиция, в которой наличие маркера идентифицирует состояние готовности выполнения СУ-маршрутизатора своих функций (приема-передачи сообщений);

Переходы:

— $On\ 1, On\ 2, On\ 3$ — переходы, которые реализуют процесс „пробуждения“ СУ $n_0^i \in N0$;

— $Collect\ 1, Collect\ 2, Collect\ 3$ — переходы, которые реализуют процессы регистрации информации СУ $n_0^i \in N0$ и готовят сообщение $m = (n_0^i, k)$ к передаче на СУ-маршрутизатор n ;

— $Send\ 1, Send\ 2, Send\ 3$ — переходы, которые реализуют процессы приема-передачи сообщений $m = (n_0^i, k)$ от СУ $n_0^i \in N0$ к СУ-маршрутизатору n ;

— $Register$ — переход, который реализует процесс приема-передачи сообщений $m = (n_0^i, k)$ от СУ n базовой станции n^* с выполнением последней функций загрузки в БД БСС.

3.3. Апробация предложенного подхода.

3.3.1. Постановка задачи. Полагаем, что в рассматриваемой типовой БСС реализована технология ZigBee [29], [30]. Альянс крупнейших разработчиков аппаратных и программных средств анонсировал единый стандарт ZigBee 3.0, позиционируя его как удобное средство для разработчиков продуктов и услуг, относящихся к IoT, и ряд крупных корпораций, таких как IBM, объявил о миллиардных инвестициях в данное направление.

БСС имеет кластерную топологию с 22 сенсорными узлами, разделенными на четыре кластера. В первом 8 сенсоров-регистраторов, во втором 7 сенсоров-регистраторов, в третьем 4 сенсора-регистратора, в четвертом 3 сенсора-регистратора. В каждом кластере также есть по одному сенсору-маршрутизатору, который собирает сообщения со всех СУ-

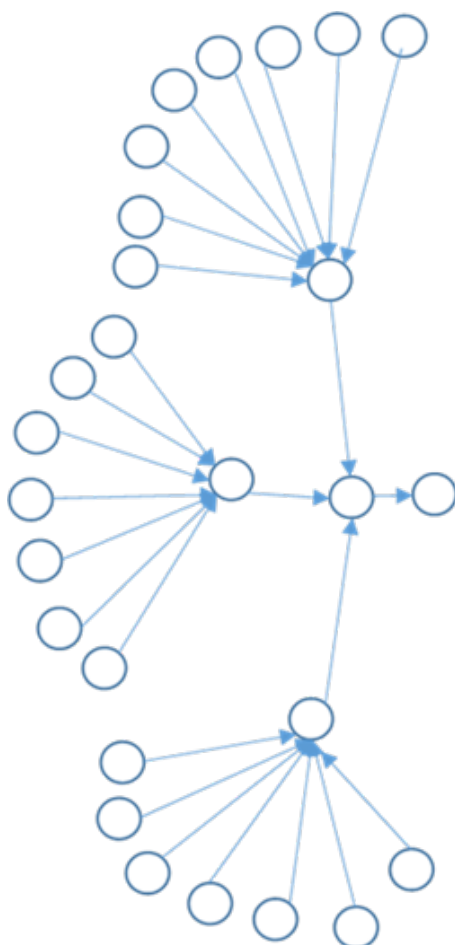


Рис. 10. Топология БСС после кластеризации

регистраторов в соответствующем кластере и отправляет их СУ-координатору, который передает сообщение на базовую станцию.

В качестве альтернативного варианта рассматриваем модификацию данной БСС за счет объединения третьего и четвертого кластера в один, т. е. имеем топологию с тремя кластерами (соответственно — 8, 7 и 7 СУ). Так как цена на сенсоры-маршрутизаторы может быть достаточно высокой, то вариант с тремя кластерами ориентирован на сокращение количества маршрутизаторов, сохраняя при этом приемлемый коэффициент загрузки каждого маршрутизатора. После перераспределения сенсоров на кластеры получилась следующая топология сети (рис. 10).

Предполагаем, что все СУ-регистраторы имеют одинаковые технические характеристики (затрачиваемое время на регистрацию информационного сообщения, время на передачу информационного сообщения). Аналогично, СУ маршрутизаторы, координатор и базовая станция характеризуются одинаковым параметром времени, затрачиваемым на прием или передачу сообщений.

Для численных экспериментов были взяты следующие значения параметров:

- Интервал моделирования равен 36000 единицам времени;
- Регламент регистрации сообщений: 720 сообщений для каждого СУ с интервалом 50 единиц времени;
- Варианты временных параметров для СУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры функционирования СУ, выбранные для экспериментов
(время указано в условных единицах)

Параметры	Варианты параметров СУ				
	1	2	3	4	5
Время регистрации и формирования инф. сообщения	5	10	15	10	10
Время передачи сообщения от СУ-регистратора к СУ-маршрутизатору	1	1	1	3	5
Время передачи сообщения от СУ-маршрутизатора к СУ координатору и от координатора к БС	1	1	1	1	1
Принятое за нормативное время доставки на БС (для расчета планового времени доставки)	16	20	25	22	24

Отметим, что планируемое время доставки i -го сообщения на базовую станцию рассчитывалось как время начала регистрации t_i + сумма процессов регистрации и приема-передачи на всем маршруте + закладываемый норматив на возможное ожидание приема-передачи сообщения (в экспериментах взято 2 единицы времени на каждой операции приема-передачи сообщения).

С учетом информации раздела 1.2, для оценки качества БСС были посчитаны следующие параметры:

- процент сообщений, пришедших раньше запланированного времени доставки на базовую станцию;
- процент сообщений, пришедших позже запланированного времени доставки на базовую станцию;
- среднее время отставания сообщений от запланированного срока доставки на базовую станцию;
- процент сообщений, пришедших точно в планируемый срок;
- процент доставленных сообщений на базовую станцию;
- среднее время доставки одного сообщения.

В первой серии численных экспериментов моделирования ставилась задача проанализировать, как влияют технические характеристики сенсорных узлов на параметры функционирования БСС при базовом варианте топологии (с 4 кластерами).

Во второй серии (варианты 4–7) численных экспериментов моделирования ставилась задача проанализировать, как влияют различные варианты двух топологий на параметры функционирования БСС.

3.3.2. Цветная временная иерархическая сеть Петри — модель рассматриваемой БСС. С учетом разработанных и приведенных выше вариантов спецификации в виде CPN tools типовых топологий БСС для рассматриваемой сенсорной сети с 4 кластерами (8, 7, 4 и 3 СУ соответственно) разработана модель в виде цветной временной иерархической сети Петри. Разработанная модель реализована в CPN tools. Реализация представлена на рис. 11 для варианта с 4 кластерами и на рис. 12 для варианта с 3 кластерами.

Модель состоит из головного блока и блоков „модель СУ-регистратора „Group i “, „модель СУ-маршрутизатор“ и „модель координатор-базовая станция“. Поскольку в разделе

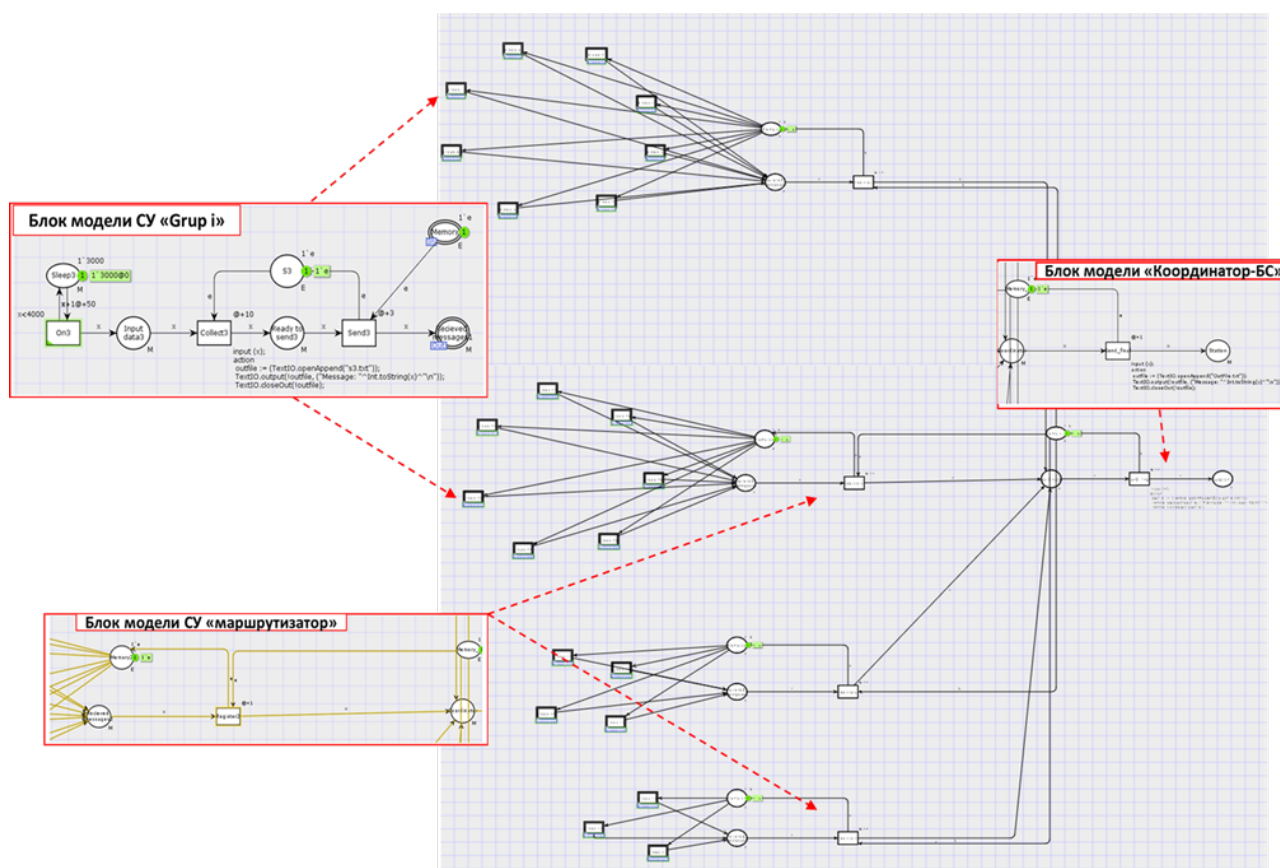


Рис. 11. Модель БСС с 4 кластерами в виде цветной временной иерархической сети Петри

были подробно специфицированы элементы сетей Петри для типовых вариантов топологий БСС, приведем краткое описание данной модели.

Переходы:

- Group 1, Group 2, ... в модели интерпретируются в виде обращений к соответствующим блокам, которые моделируют СУ-регистраторы.
- Register 1, Register 2, Register 3, Register 4 в модели интерпретируются в виде обращений к соответствующим блокам, которые моделируют СУ-маршрутизаторы.

Позиции в конкретных блоках интерпретируются следующим образом:

- Sleep[1, 2, ...] — позиция, в которой СУ-регистратор находится в спящем состоянии;
- Input data[1, 2, ...] — позиция, в которой маркер ожидает регистрации сенсорным узлом;
- Ready to send[1, 2, ...] — позиция, в которой маркер-сообщение зарегистрирован СУ-регистратором и ожидает передачи на маршрутизатор;
- S[1, 2, ...] — позиция, в которой наличие маркера идентифицирует состояние готовности выполнения СУ-регистратора своих функций;
- Memory[1, 2, ...] — позиция, в которой наличие маркера обозначает занятость маршрутизатора;
- Received messages[1, 2, ...] — позиция, в которой маркер находится в памяти маршрутизатора и ожидает передачи на координатор;
- Coordinator — позиция, в которой маркер находится в памяти координатора и ожидает передачи на базовую станцию;

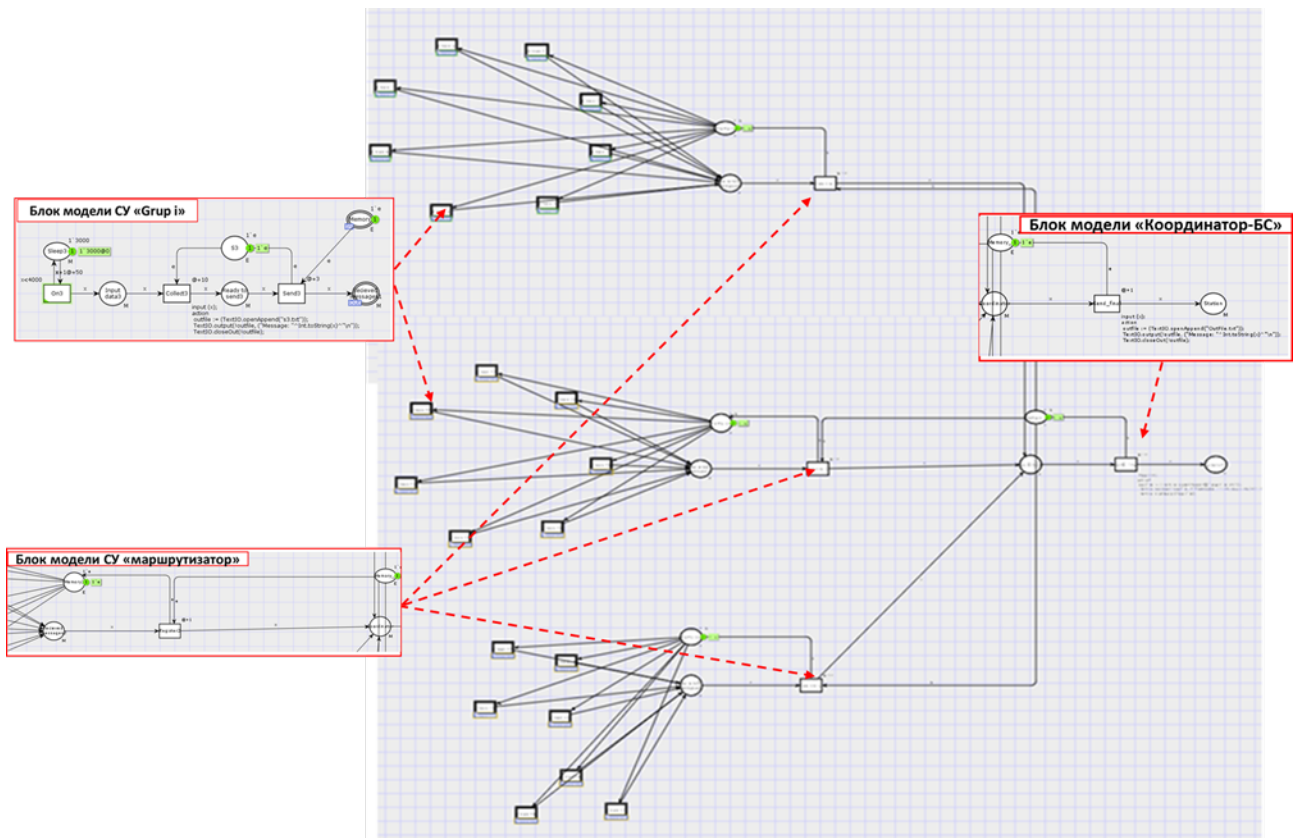


Рис. 12. Модификация модели БСС на случай с 3 кластерами в виде цветной временной иерархической сети Петри

— Memory_c — позиция, в которой наличие маркера обозначает занятость координатора;

— Station — позиция, в которой маркер находится на базовой станции.

Переходы в конкретных блоках интерпретируются следующим образом:

— On[1, 2, ...] — переход, который реализует процесс „пробуждения“ СУ-регистратора;

— Collect[1, 2, ...] — переход, который реализует процесс регистрации информации СУ-регистратором и готовит сообщение к передаче;

— Send[1, 2, ...] — переход, который реализует процесс приема-передачи сообщения от СУ-регистратора к СУ-маршрутизатору;

— Register[1, 2, ...] — переход, который реализует процесс приема-передачи сообщения от СУ-маршрутизатора координатору;

— Send_final — переход, реализующий передачу сообщения от координатора на базовую станцию.

В модели рассматриваются два типа (цвета) маркеров:

— Цвет M, который характеризует маркеры-сообщения;

— Цвет S, который характеризует маркеры, отражающие занятость сенсорных узлов (изначально находятся в состояниях S, Memory, Memory_c).

Приведем краткое описание процесса моделирования.

Каждые 50 единиц времени в каждом СУ-регистраторе генерируется сообщение. В модели это отражено следующим образом: из состояния Sleep посредством перехода On СУ-регистратор „просыпается“ и приходит в состояние Input data. Далее, если СУ свобо-

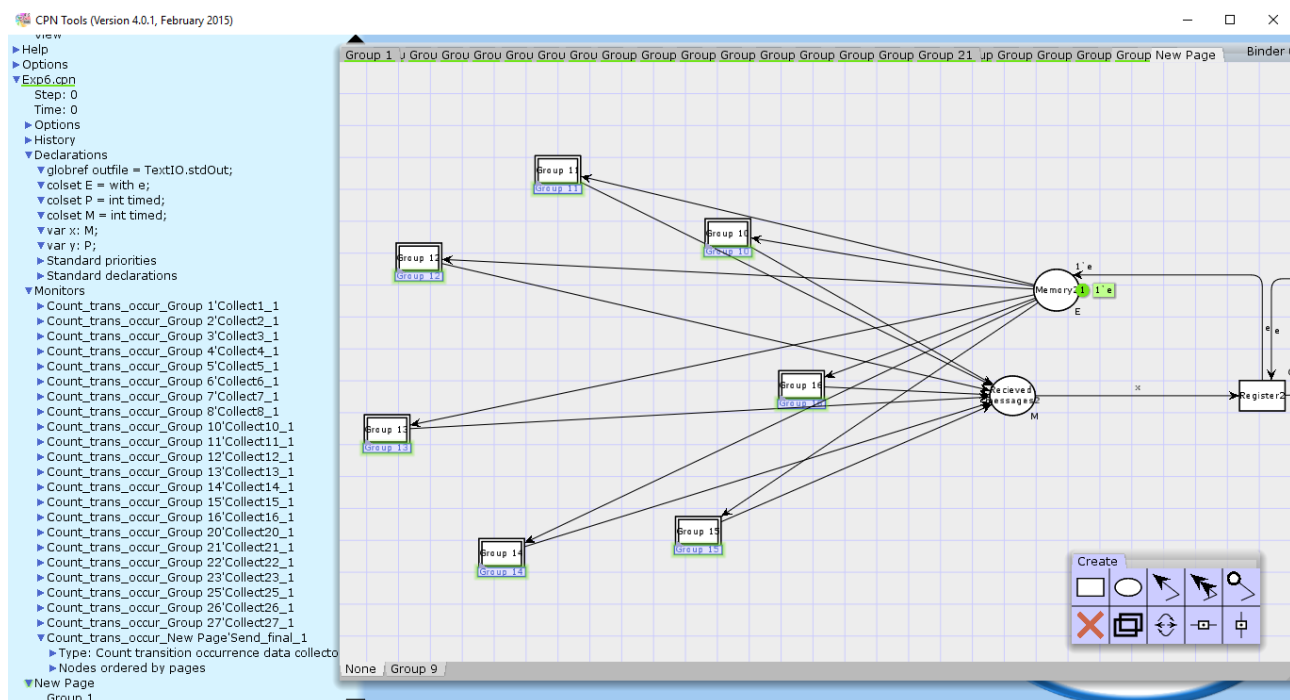


Рис. 13. Главная страница модели в среде CPN tools

ден (т. е. в S есть маркер), то SU начинает регистрировать поступившее сообщение (т. е. срабатывает переход $Collect$, и сообщение переходит в состояние Ready to send).

Если маршрутизатор свободен (в $Memory$ есть маркер), то происходит прием-передача сообщений путем срабатывания перехода $Send$.

Маршрутизатор в свою очередь проверяет, свободен ли координатор (наличие маркера в состоянии $Memory_c$), и в случае, если он свободен, передает сообщение ему с помощью перехода $Register$.

Координатор далее передает сообщение на базовую станцию путем срабатывания перехода $Send_final$.

Переходы $Collect$, $Send$, $Register$, $Send_final$ срабатывают с задержкой, которая отражает время, затрачиваемое на процессы регистрации, приема-передачи на маршрутизатор, координатор, базовую станцию соответственно.

Главная страница модели в среде CPN tools, с которой запускается на компьютере численный эксперимент, представлена на рис. 13.

3.3.3. Результаты моделирования и их анализ. Для численных экспериментов были взяты следующие значения параметров:

- Интервал моделирования равен 36000 единицам времени;
- Регламент регистрации сообщений: 720 сообщений для каждого SU с интервалом 50 единиц времени;
- Варианты временных параметров для SU приведены в табл. 1;
- Планируемое время доставки i -го сообщения на базовую станцию рассчитывалось как время начала регистрации t_i + сумма процессов регистрации и приема-передачи на всем маршруте + закладываемый норматив на возможное ожидание приема-передачи сообщения (в экспериментах взято 2 единицы времени на каждой операции приема-передачи сообщения).

Таблица 2

Коэффициенты загрузки СУ на рассматриваемом интервале моделирования

Сенсорные узлы	Номер численного компьютерного эксперимента				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Вариант топологии с 4 кластерами					
СУ-маршрутизатор для кластера 1 (8 СУ)	32 %	32 %	32 %	64 %	96 %
СУ-маршрутизатор для кластера 2 (7 СУ)	28 %	28 %	28 %	56 %	84 %
СУ-маршрутизатор для кластера 3 (4 СУ)	16 %	16 %	16 %	32 %	48 %
СУ-маршрутизатор для кластера 4 (3 СУ)	12 %	12 %	12 %	24 %	36 %
СУ-регистраторы	12 %	22 %	32 %	26 %	30 %
Вариант топологии с 4 кластерами					
СУ-маршрутизатор для кластера 1 (8 СУ)	—	—	—	64 %	96 %
СУ-маршрутизатор для кластера 2 (7 СУ)	—	—	—	56 %	84 %
СУ-маршрутизатор для кластера 3 (7 СУ)	—	—	—	56 %	84 %
СУ-регистраторы	—	—	—	26 %	30 %
СУ-координатор	44 %	44 %	44 %	44 %	44 %
Базовая станция	44 %	44 %	44 %	44 %	44 %

В результате численного моделирования на реализованных в CPN tools моделях траектория функционирования БСС на рассматриваемом временном интервале описывается расписанием доставки сообщений от места регистрации до базовой станции (т.е. трафиком сети) с учетом технологических ограничений на маршрут доставки и условий занятости СУ. Данная информация выгружается в формат (таблицы) Excel, на основе которой рассчитываются используемые для анализа параметры оценки качества БСС, которые сформулированы в начале раздела.

Сделать анализ проведенных численных экспериментов на предварительном этапе, не прибегая к процессу моделирования, можно путем прямых вычислений. На основе исходной информации можно сделать общую оценку загрузки сенсорных узлов на рассматриваемом временном интервале. Данная информация позволяет при анализе результатов моделирования процессов функционирования БСС оценить влияние топологии на качество БСС, в т.ч. при различных коэффициентах загрузки СУ-маршрутизаторов.

С учетом обозначенных в табл. 2 вариантов экспериментов и двух вариантов кластерных топологий, результаты компьютерного моделирования для сформулированных выше параметров оценки качества БСС приведены в табл. 3 и табл. 4.

Далее приведен анализ влияния технических характеристик сенсорных узлов (времени регистрации информационных сообщений и времени приема\передачи сообщений) на параметры функционирования БСС при базовом варианте топологии с 4 кластерами.

Анализ результатов моделирования для вариантов №№ 1–5 показывает:

— На рассматриваемом временном интервале во всех вариантах, за исключением № 5, все сообщения доставлены (в № 5 не доставлено 1 сообщение).

— % не доставленных вовремя (относительно плановых „дат“ доставки) в целом для БСС для вариантов №№ 1–4 одинаковый. При этом, если проанализировать данный показатель по отдельным кластерам, то наблюдаем незначительные отличия в варианте № 4 от №№ 1–3.

Одновременно получили в варианте № 5 общий % опоздавших больше на 4,5 % с относительно равным расхождением по отдельным кластерам.

Таблица 3

Результаты компьютерного моделирования

	% сообщений, пришедших раньше	% сообщений, пришедших позже	Ср. время опоздания (ед. моделирования)	% пришедших точно вовремя	% доставленных всего	Ср. время доставки
Вариант № 1: топология с 4 кластерами						
Кластер 1(8)	18,13	78,09	9,11	3,78	100,00	20,48
Кластер 2(7)	21,88	74,64	8,38	3,47	100,00	19,50
Кластер 3(4)	38,89	54,62	5,64	6,49	100,00	15,71
Кластер 4(3)	48,75	44,77	5,20	6,48	100,00	14,61
Общее по БСС	27,27	68,18	8,00	4,55	100,00	18,50
Вариант № 2: топология с 4 кластерами						
Кластер 1(8)	19,25	77,31	9,09	3,44	100,00	25,33
Кластер 2(7)	22,08	74,27	8,25	3,65	100,00	24,37
Кластер 3(4)	36,67	56,84	6,08	6,49	100,00	21,17
Кластер 4(3)	48,24	44,77	5,26	6,99	100,00	19,68
Общее по БСС	27,27	68,18	8,00	4,55	100,00	23,50
Вариант № 3: топология с 4 кластерами						
Кластер 1(8)	19,25	77,31	9,09	3,44	100,00	30,33
Кластер 2(7)	22,08	74,27	8,25	3,65	100,00	29,37
Кластер 3(4)	36,67	56,84	6,08	6,49	100,00	26,17
Кластер 4(3)	48,24	44,77	5,26	6,99	100,00	24,68
Общее по БСС	27,27	68,18	8,00	4,55	100,00	28,50
Вариант № 4: топология с 4 кластерами						
Кластер 1(8)	19,01	77,76	10,87	3,23	100,00	28,78
Кластер 2(7)	21,31	75,36	9,43	3,33	100,00	27,37
Кластер 3(4)	36,60	57,19	4,97	6,22	100,00	22,56
Кластер 4(3)	50,79	40,56	3,53	8,66	100,00	20,64
Общее по БСС	27,27	68,18	8,87	4,55	100,00	26,09
Вариант № 5: топология с 4 кластерами						
Кластер 1(8)	15,16	81,46	16,75	3,39	99,99	36,06
Кластер 2(7)	18,17	78,29	14,22	3,53	100,00	33,44
Кластер 3(4)	31,53	62,19	6,71	6,28	100,00	25,98
Кластер 4(3)	41,81	50,51	4,15	7,69	100,00	23,52
Общее по БСС	22,73	72,73	13,13	4,55	99,99	31,68
Вариант № 4: топология с 3 кластерами						
Кластер 1(8)	25,00	70,95	-8,98	4,05	100,00	26,49
Кластер 2(7)	28,57	66,09	-7,51	5,34	100,00	24,95
Кластер 3(7)	28,57	67,10	-7,51	4,33	100,00	25,06
Общее по БСС	27,27	68,18	-8,07	4,55	100,00	25,55
Вариант № 3: топология с 4 кластерами						
Кластер 1(8)	16,20	79,13	-16,67	4,67	99,99	35,53
Кластер 2(7)	19,27	75,95	-14,14	4,78	100,00	32,97
Кластер 3(7)	19,37	76,47	-14,07	4,17	100,00	33,00
Общее по БСС	18,18	77,27	-15,06	4,55	99,99	33,91

Таблица 4

Результаты компьютерного моделирования,
упорядоченные по вариантам для анализа первой серии

4 кластера	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 4	Вариант № 5
% сообщений, пришедших позже					
Кластер 1(8)	78,09	77,31	77,31	77,76	81,46
Кластер 2(7)	74,64	74,27	74,27	75,36	78,29
Кластер 3(4)	54,62	56,84	56,84	57,19	62,19
Кластер 4(3)	44,77	44,77	44,77	40,56	50,51
Общее по БСС	68,18	68,18	68,18	68,18	72,73
Ср. время опоздания (ед. моделирования)					
Кластер 1(8)	9,11	9,09	9,09	10,87	16,75
Кластер 2(7)	8,38	8,25	8,25	9,43	14,22
Кластер 3(4)	5,64	6,08	6,08	4,97	6,71
Кластер 4(3)	5,20	5,26	5,26	3,53	4,15
Общее по БСС	8,00	8,00	8,00	8,87	13,13
Ср. время доставки (ед. моделирования)					
Кластер 1(8)	20,48	25,33	30,33	28,78	36,06
Кластер 2(7)	19,50	24,37	29,37	27,37	33,44
Кластер 3(4)	15,71	21,17	26,17	22,56	25,98
Кластер 4(3)	14,61	19,68	24,68	20,64	23,52
Общее по БСС	18,50	23,50	28,50	26,09	31,68
% увеличения относительно установленного норматива	15,6	17,5	14	18,6	13,2
3 кластера	Вариант № 4	Вариант № 5			
% сообщений, пришедших позже					
Кластер 1(8)	70,95	79,13			
Кластер 2(7)	66,09	75,95			
Кластер 3(7)	67,10	76,47			
Общее по БСС	68,18	77,27			
Ср. время опоздания (ед. моделирования)					
Кластер 1(8)	8,98	16,67			
Кластер 2(7)	7,51	14,14			
Кластер 3(7)	7,51	14,07			
Общее по БСС	8,07	15,06			
Ср. время доставки (ед. моделирования)					
Кластер 1(8)	26,49	35,53			
Кластер 2(7)	24,95	32,97			
Кластер 3(7)	25,06	33,00			
Общее по БСС	25,55	33,91			
% увеличения относительно установленного норматива	16,1	14,1			

Если посмотреть данные табл. 2 коэффициентов загрузки маршрутизаторов, то увидим, что загрузка маршрутизаторов 1 и 2-го кластеров соответственно 96 % и 84 %. Именно

данное обстоятельство повлияло на увеличение числа опоздавших сообщений в варианте № 5 по отношению к №№ 1–4.

— Анализ результатов моделирования относительно показателя „среднее время опоздания в единицах моделирования“ показывает, что увеличение времени на передачу сообщений от СУ-регистраторов к СУ-маршрутизаторам возрастает в варианте № 4 на 0,87 единиц и на 5,13 единиц в варианте № 5 относительно первых трех вариантов.

— Среднее время доставки сообщений на базовую станцию в % отношении к нормативному отличается незначительно, и какой-то закономерности не наблюдается.

Анализ влияния топологий на параметры функционирования БСС на примере двух топологий (с 3 и 4 кластерами) с вариантами характеристик СУ № 4 и № 5.

— При значении параметра времени регистрации 10 единиц и времени на передачу сообщения 3 единицы (вариант № 4) при равном % опоздавших, вариант с топологией с тремя кластерами по отношению к четырехкластерной топологии показывает результаты лучше по параметрам:

- среднее время опоздания в единицах моделирования на 0,8 единиц;
- среднее время доставки на базовую станцию на 0,8 единиц;
- на 2,5 % сокращено увеличение длительности доставки сообщений на базовую станцию относительно нормативной.

Характерно, что улучшение произошло при увеличении загрузки третьего кластера в варианте с трехкластерным вариантом.

— Вариант № 5 относительно характеристик СУ (время регистрации 10 единиц и времени на передачу сообщения 5 единиц) с достаточно высоким коэффициентом загрузки маршрутизаторов (96 %, 84 %, 84 %; в варианте № 4 — 64 %, 56 %, 56 %) показал:

- Увеличение % опоздавших на 4,54 %;
- Увеличение среднего времени опоздания на 4,93 единицы;
- Увеличение среднего времени доставки в целом по БСС на 2,23 единицы при этом % увеличения относительно нормативной составило 0,9 %.

При сравнении двух топологий можно сделать следующий общий вывод: для сохранения качества БСС коэффициент загрузки маршрутизаторов не должен превышать 70–75 %. В данном случае топология с тремя кластерами лучше, чем четырехкластерная топология.

Заключение. В данной работе рассмотрены вопросы разработки инструментария оценки эффективности беспроводных сенсорных сетей. Предложены соответствующие математические и программные средства. Предложен аналитический метод анализа БСС для типовой топологии с учетом модифицированного критерия эффективности. Обосновано отсутствие оптимальной топологии в общем виде. Предложено представление БСС в виде временных раскрашенных сетей Петри. Выполнена апробация предложенного подхода к моделированию на примере типовой топологии, характерной для LoRaWAN, используемых в области цифрового земледелия систем, разработанных в рамках концепции Edge computing приложений и т. д. Проведен анализ рассматриваемой БСС, показывающий влияние технических характеристик сенсорных узлов на параметры функционирования БСС.

Список литературы

1. Uckelmann D., Harrison M., Michahelles F. *Architecting the Internet of Thing*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011. P. 10–11.
2. Cho J. et al. SARIF: A Novel Framework for Integrating Wireless Sensor and RFID Networks. Dec. 2007 // *IEEE Wireless Commun.* V. 14. N 6. P. 50–56.
3. Тарханова О. Ю. Применение беспроводных сенсорных сетей в прецизионном сельском хозяйстве // *Проблемы информатики*. 2017. № 4. С. 16–46.
4. Romer K. and Mattern F. The design space of wireless sensor networks // *IEEE Wireless Commun.* Dec. 2004. V. 11. N 6. P. 54–61.
5. Shakhov Vladimir. Performance Evaluation of MAC Protocols in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks. *Lecture Notes in Computer Science* // Springer. 2016. V. 9787. P. 344–352.
6. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P. and Soljacic M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances // *Science*. 2007. V. 317. N 5834. P. 83–86.
7. Yang, S. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications* // Springer-Verlag London. 2014. ISBN 978-1-4471-5505-8.
8. Karl, H. & Willig, A. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons. 2007.
9. Borges L. M., Velez F. J., Lebres A. S. Survey on the characterization and classification of wireless sensor networks applications // *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, Nov. 2014. V. 16. N 4. P. 1860–1890.
10. Ding Z. etc. Impact of Optimal Hop Distance on the Network Lifetime for Wireless Sensor Networks With QoS Requirements // *IEEE Communications Letters*. 2019. Vol. 23. N 3.
11. Xiaobo Tan, Hai Zhao, Guangjie Han, Wenbo Zhang, Teng Zhu QSDN-WISE: A New QoS-Based Routing Protocol for Software-Defined Wireless Sensor Networks // *Access IEEE*. 2019. V. 7. P. 61070–61082.
12. Atia G. K., Veeravalli V. V., and Fuemmeler J. A. Sensor scheduling for energy-efficient target tracking in sensor networks // *IEEE Trans. Signal Process.*, Oct. 2011. V. 59. N 10. P. 4923–4937.
13. Yeow W.-L., Tham C.-K., and Wong W.-C. Energy efficient multiple target tracking in wireless sensor networks // *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Mar. 2007. V. 56. N 2. P. 918–928.
14. Pandana C. and Liu K. R. Near-optimal reinforcement learning framework for energy-aware sensor communications // *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Apr. 2005. V. 23. N 4. P. 788–797.
15. Shakhov Vladimir, Koo Insoo. Depletion-of-Battery Attack: Specificity, Modelling and Analysis // *Sensors*, June 2018. V. 18. N 6.
16. Chau, C.; Qin, F.; Sayed, S.; Wahab, M.; Yang, Y. Harnessing battery recovery effect in wireless sensor networks: experiments and analysis // *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2010. N 28. P. 1222–1232.
17. Bouabdallah, F.; Bouabdallah, N.; Boutaba, R. On balancing energy consumption in wireless sensor networks // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2009. N 58. P. 2909–2924.
18. Meng, T.; Li, X.; Zhang, S.; Zhao, Y. A Hybrid Secure Scheme for Wireless Sensor Networks against Timing Attacks Using Continuous-Time Markov Chain and Queueing Model // *Sensors*. 2016. N 16. P. 1606.
19. Alsheikh M. A. etc. Markov decision processes with applications in wireless sensor networks: A survey // *IEEE Commun. Surveys Tuts.* 2015. V. 17. N 3. P. 1239–1267, 3rd Quart.
20. Shakhov Vladimir V. A Graph-based Method for Performance Analysis of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks Reliability // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, 2016. V. 391. P. 127–132.
21. Kamgueu P. O., Nataf E., Ndie T. D. Survey on RPL enhancements: A focus on topology, security and mobility // *Computer Communications*. 2018. V. 120. P. 10–21.
22. DATA COLLECTION NETWORK FOR AGRICULTURE AND OTHER APPLICATIONS, US 2014/0024313 A1.
23. Shakhov V. V., Migov D. A. Reliability of Ad Hoc Networks with Imperfect Nodes // *Springer LNCS*, 2014. V. 8715. P. 49–58.

24. Page Lavon B., Perry Jo Ellen. Reliability of Directed Networks using: the Factoring Theorem // IEEE Transactions on Reliability, 1989 Dec. V. 38, N 5.
25. Migov D. Parallel Methods for Network Reliability Calculation and Cumulative Updating of Network Reliability Bounds // Proc. of the IEEE 2nd Russian-Pacif Conference on Computer Technology and Applications. 2015. P. 1–5.
26. Yu Z. et al. Trustworthiness Modeling and Analysis of Cyber-physical Manufacturing Systems // IEEE Access, 2017. V. 5.
27. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М: Мир, 1984.
28. Jensen Kurt, Kristensen Lars M. Colored Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems / Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
29. [Electron. res.]: <https://zigbeealliance.org/>.
30. Tung H. Y. et al. The generic design of a high-traffic advanced metering infrastructure using ZigBee // IEEE Trans. Ind. Informat., Feb. 2014. V. 10. N 1. P. 836–844.



Олеся Юрьевна Тарханова — обучалась на Механико-математическом факультете Новосибирского государственного университета, в 2017 году получила степень бакалавра, в 2019 степень магистра. Специализировалась на

кафедре дискретной математики и информатики. В 2018 начала работать в Институте цитологии и генетики СО РАН. Ее научные интересы включают информационные системы, математическое и имитационное моделирование.

Olesya Tarkhanova received her B.S. (2017) and M.S. (2019) from the Novosibirsk State University, where she studied Discrete Mathematics and Informatics at the Department of Mechanics and Mathematics. In 2018 she joined the Institute of Cytology and Genetics SB RAS. Her research interests include Information Systems, Modeling and Simulation.

Владимир Владимирович Шахов — старший научный сотрудник Лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН и до-

цент Новосибирского государственного технического университета. Окончил Механико-математический факультет Новосибирского государственного университета, получил степень кандидата физико-математических наук. Является вице-председателем Сибирской секции IEEE. Научные интересы включают моделирование и оценку производительности технических систем, технологии Интернета вещей, интеллектуальный анализ данных.



Dr. Vladimir Shakhov is a Senior Researcher with the Laboratory of system modeling and optimization of Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS and Associate Professor of Novosibirsk State Technical University. He received the B.S. in mechanics and applied mathematics, M.S. degrees in mathematics, and Ph.D. degree in computer science from the Novosibirsk State University. He is the Vice Chair of the IEEE Russian Siberia Section. His research interests include Applied Mathematics with Computer Science Applications, IoT Technologies, and Data Analytics.

Дата поступления — 06.02.2020