

## ANALYSIS OF NETWORKS WITH NON-STATIONARY TOPOLOGY. SURVEY

V. V. Shakhov<sup>\*,\*\*</sup>, O. D. Sokolova<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics  
630090, Novosibirsk, Russia

<sup>\*\*</sup>Novosibirsk State Technical University  
630073, Novosibirsk, Russia

---

DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014

In recent years, the great technological leap comes with non-stationary network topology. The examples include systems with mobile subscribers, networks with nodes on vehicles (VANET, Vehicle ad-hoc network), unmanned aerial vehicles, etc. In addition, the topology of fixed networks can also change due to intentional or unintentional destructive effects, features network protocols (multiple relays, transmission range and route are highly variable., etc.). The methods used to solve problems of classical networks (for example, centralized routing with a hierarchy of pre-assigned routers) turn out to be ineffective under the new conditions; adaptation of models and approaches is required.

Both foreign and Russian companies are engaged in research on the optimization of data transmission in non-stationary networks, international projects are being carried out. Among the urgent tasks are the following: the impact of node mobility on network performance, localization of mobile nodes, determination of the effective transmission coverage area, energy efficiency, etc. One of these tasks is to improve the quality of communication between transport means and the Internet. In VANET networks, the role of stations transmitting information from moving objects to the network is performed by roadside equipment (RSU, road side unit). But their disadvantage is that they are stationary, after being installed on the side of the road, they cannot be moved. Therefore, as the traffic flow changes, there will be either a shortage or an excess of such facilities. Compared to stationary RSUs, unmanned aerial vehicles can move depending on changes in traffic flow. So, there is a problem of increasing the network coverage for VANET using unmanned aerial vehicles that act as base stations. Many publications are devoted to the description of technologies for localization of wireless mobile sensors, for example, based on the Monte-Carlo Location algorithm.

To solve some important applied problems, there is no need to analyze the behavior of the entire network with mobile nodes; it is enough to consider the behavior of the system in some neighborhood of interest to the researcher. For example, it can be the coverage area of the transceiver, which is equipped with a roadside infrastructure device, road segments where deliberate interference occurs, an area of increased air pollution, etc. In this case, to analyze various indicators of network efficiency, the theory of random processes is used, and here, Markov chains with continuous time occupy a special place, since they allow a fairly accurate description of the behavior of real systems. Also the mathematical apparatus is well developed for them. In particular, when studying automobile networks (VANET, V2X, IoV), Poisson streams of events are often used. The relevant Markov chain changes state under the influence of these streams. Using the Poisson process, both vehicle traffic and transmitted data packets flows are modeled.

---

The study was supported by grant of the RFBR № 19-01-00562-a.

In many publications, random graphs and hypergraphs are considered as models of non-stationary networks. The use of models and algorithms of graph theory allows you to investigate the relationship between various elements in the network, to solve the problems of optimizing data transmission. For example, hypergraph models are useful for accounting for interference in networks with a large number of mobile nodes. The use of graph theory algorithms for solving problems is mainly divided into two categories: researching data on mobile users to determine traffic patterns and planning the functioning of a cellular network with a resource spectrum.

Further, in the proposed review, publications of recent years are analyzed, in which various methods of modeling networks with mobile nodes and algorithms for the optimal functioning of such networks are investigated.

**Key words:** non-stationary networks, models of networks with mobile nodes, queuing systems, simulation.

## References

1. Wu X. A Hybrid View of Mobility in MANETs: Analytical Models and Simulation Study // *Computer Comm.* 2008. Vol. 31. N. 16. P. 3810–3821.
2. Barani, H., Fathy, M. An Algorithm for Localization in Vehicular Ad-Hoc Networks. // *Journal of Computer Science.* 2010. Vol. 6. N 2. P. 168–172.
3. Liu C., Yang O., Li G, Shu Y. Effective Transmission Coverage Area-Based Link Dynamics Characterization of VANET in Highway Scenario // *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 2015. Vol. 11. N 10.
4. Elhoseny M., Shankar K. Energy Efficient Optimal Routing for Communication in VANETs via Clustering Model. // *Emerging Technologies for Connected Internet of Vehicles and Intelligent Transportation System Networks. Studies in Systems, Decision and Control.* 2020. Vol. 242.
5. Liu T., Zhao L., Li B., Zhao C. Research on the Enhancement of VANET Coverage Based on UAV. // Liang Q., Wang W., Liu X., Na Z., Jia M., Zhang B. (eds) *Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS.2019. Lecture Notes in Electrical Engineering.* Vol. 571. Springer, Singapore.
6. Qiu, Z., Wu, L., Zhang, P. An Efficient Localization Method for Mobile Nodes in Wireless Sensor Networks // *International Journal of Online Engineering.* 2017. Vol. 13. N 3.
7. Sokolova O., Yurgenson A. Using graph, hypergraph, and hypernet models for network analysis problems // *Proc. 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2012.*
8. Reddy A. R., Venkatesh D., Ramesh K. Hypergraph Interference Models in Wireless Ad-Hoc Networks with Low Complexity Distributed Scheduling // *International journal of scientific research.* 2012. 2. P. 237–240.
9. Webb J., Docemmilli F., Bonin, M. Graph Theory Applications in Network Security // *ArXiv.* 2015. abs/1511.04785.
10. Yang L., Yu Y. H. A Mobile Frequency Allocation Algorithm Based on the Graph Theory // *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications.* 2015.
11. Goldin D., Attia S. A. Unit Disk Graph Based Modelling of a Network of Mobile Agents // *Proceedings of the First IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems.* Venice, Italy. 2009.
12. Sorokin A. A., Dmitriev V. N. Opisaniye sistem svyazi s dinamicheskoy topologiej seti pri pomoshchi modeli „mercyayushchego grafa“ // *Vestnik AGTU. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika.* 2009. N 2. S. 134–139.
13. Eiza M. H., Ni Q. An Evolving Graph-Based Reliable Routing Scheme for VANETs // *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2013. Vol. 62. N. 4. P. 1493–1504.

14. Liu K., Ng J. K. Y., Lee V. C. S., Son S. H., Stojmenovic I. Cooperative Data Scheduling in Hybrid Vehicular Ad Hoc Networks: VANET as a Software Defined Network // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2016. Vol. 24. N 3. P. 1759–1773.
15. Mokdad, L., Ben-Othman, J., Nguyen, A.T. DJAVAN: Detecting jamming attacks in Vehicle Ad hoc Networks // *Performance Evaluation*. 2015. Vol. 87. P. 47–59.
16. Shakhov V., Sokolova O. Towards Air Pollution Detection with Internet of Vehicles // 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems, Novosibirsk, Russia, 2019, P. 183–186.
17. Deng D., Lien S., Lin C., Hung S., Chen W. Latency Control in Software-Defined Mobile-Edge Vehicular Networking // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55. N 8, P. 87–93.
18. Zhou S., Sun Y., Jiang Z., Niu Z. Exploiting Moving Intelligence: Delay-Optimized Computation Offloading in Vehicular Fog Networks // *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57. N 5. P. 49–55.
19. Zhou Z., Yu H., Xu C., Chang Z., Mumtaz S., Rodriguez J. BEGIN: Big Data Enabled Energy-Efficient Vehicular Edge Computing // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. N 12. P. 82–89.
20. Bertsekas D., Gallager R. *Seti peredachi dannyh. M.*: Mir, 1989.
21. Zhu H., Fu L., Xue G., Zhu Y., Li M., NiL. M. Recognizing Exponential Inter-Contact Time in VANETs // *Proceedings IEEE INFOCOM*, San Diego, CA, 2010. P. 1–5.
22. Jiang R., Zhu Y., Yang Y. Improving Throughput and Fairness of Converge cast in Vehicular Networks // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2017. Vol. 16. N 11. P. 3070–3083.
23. Li Y., Jin D., Hui P., Chen S. Contact-aware data replication in roadside unit aided vehicular delay tolerant networks // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2016. Vol. 15. N 2. P. 306–321.
24. Liu Y., Peng M., Shou G., Chen Y., Chen S. Toward Edge Intelligence: Multiaccess Edge Computing for 5G and Internet of Things // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. N 8. P. 6722–6747.
25. Guo H., Liu J., Zhang J. Computation Offloading for Multi-Access Mobile Edge Computing in Ultra-Dense Networks // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. N 8. P. 14–19.
26. Mao Y., You, C. Zhang J., Huang K., Letaief K. B. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19. N 4. P. 2322–2358.
27. Krylov V. V., Samohvalova S. S. *Teoriya teletrafika i ee prilozheniya* // SPb.: BHV-Peterburg, 2005.
28. Hashim M. F., Abdul Razak, N. I. Ultra-Dense Networks: Integration with Device to Device (D2D) Communication // *Wireless Personal Communications*. 2019. Vol. 106. P. 911–925.
29. Zhang K., Mao, Y. Leng S., He Y., Zhang Y. Mobile-Edge Computing for Vehicular Networks: A Promising Network Paradigm with Predictive Off-Loading // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2017. Vol. 12. N 2. P. 36–44.
30. Thai M., Lin Y., Lai Y., Chien H. Workload and Capacity Optimization for Cloud-Edge Computing Systems with Vertical and Horizontal Offloading // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2020. Vol. 17. N 1. P. 227–238.
31. Cui L., Xu C., Yang S., Huang J. Z., Li J., Wang X., Ming Z., Lu N. Joint Optimization of Energy Consumption and Latency in Mobile Edge Computing for Internet of Things // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. P. 4791–4803.
32. Chen Y., Sun Y., Feng T., Li S. A Collaborative Service Deployment and Application Assignment Method for Regional Edge Computing Enabled IoT // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 112659–112673.
33. Islambouli R., Sharafeddine S. Optimized 3D Deployment of UAV-Mounted Cloudlets to Support Latency-Sensitive Services in IoT Networks // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 172860–172870.

34. Ebrahimzadeh A., Maier M. Cooperative Computation Offloading in FiWi Enhanced 4G HetNets Using Self-Organizing MEC // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19. N 7. P. 4480–4493.
35. Wang S., Zhang X., Yan Z., Wenbo W. Cooperative Edge Computing With Sleep Control Under Nonuniform Traffic in Mobile Edge Networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. N 3. P. 4295–4306.
36. Hajipour J. Stochastic Buffer-Aided Relay-Assisted MEC // *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24. N 4. P. 931–934.
37. Doan T. V., You D., Salah H., Nguyen G. T., Fitzek H. P. F. MEC-assisted Immersive Services: Orchestration Framework and Protocol // *IEEE Intern. Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, Jeju, Korea (South), 2019. P. 1–6.
38. Wu S., Xia W., Cui W., Chao Q., Lan Z., Yan F., Shen L. An Efficient Offloading Algorithm Based on Support Vector Machine for Mobile Edge Computing in Vehicular Networks // *10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Hangzhou. 2018. P. 1–6.
39. Zhang Q., Chen J., Ji L., Feng Z., Han Z., Chen Z. Response Delay Optimization in Mobile Edge Computing Enabled UAV Swarm // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69. N 3. P. 3280–3295.
40. Belogaev A., Elokhin A., Krasilov A., Khorov E., Akyildiz I. F. Cost-Effective V2X Task Offloading in MEC-Assisted Intelligent Transportation Systems // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 169010–169023.
41. Zhou Z., Yu S., Chen W., Chen X. CE-IoT: Cost-Effective Cloud-Edge Resource Provisioning for Heterogeneous IoT Applications // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. N 9. P. 8600–8614.
42. Nguyen M. N. H., Zaw C. W., Kim K., Tran N. H., Hong C. S. Let's Share the Resource When We're Co-Located: Co-location Edge Computing // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69. N 5. P. 5618–5633.
43. Wang Y., Yang J., Guo X., Qu Z. A Game-Theoretic Approach to Computation Offloading in Satellite Edge Computing // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 12510–12520.
44. Al-Mayouf Y. R. B., Ismail M., Abdullah N. F., Al-Qaraawi S. M., Mahdi O. A. Survey on VANET technologies and simulation models // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. N 15. P. 9414–9427.
45. Jukic Z., Arshad M. Review of Simulation Based Comparison of VANET Protocols // *New Technologies, Development and Application. NT 2018. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 42. Springer.
46. Sanguesa J. A., Fogue M., Garrido P., Martinez F. J., Cano J.-C., Calafate C. T. A survey and comparative study of broadcast warning message dissemination schemes for VANETs / *Mobile Information Systems*. 2016, art.ID 8714142, 18 p.
47. Elgazzar M. M. A., Alshareef A. VANET Simulator: Full Design Architecture // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2020. Vol. 9. N 3.
48. Jia D., Lu K., Wang J., Zhang X., Shen X. A Survey on Platoon-Based Vehicular Cyber-Physical Systems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18. N 1. P. 263–284.
49. VISSIM. [Electron. Res.]: <http://www.ptv-vision.com/en-uk/products/vision-traffic-suite/ptv-vissim/overview/>.
50. Harri J., Fiore M., Bonnet F. Vehicular mobility simulation with Vanet MobiSim // *Simulation*. 2009. Vol. 87. N 4. P. 275–300.
51. Behrisch M., Bieker L., Erdmann J., Krajzewicz D. SUMO simulation of urban Mobility-an overview // in *Proc. 3rd Int. Conf. Adv. Syst. SIMUL*. 2011. P. 63–68.
52. NS-3. [Electron. Res.]: <https://www.nsnam.org/>.
53. Omnetpp. [Electron. Res.]: [www.omnetpp.org](http://www.omnetpp.org).

- 
54. TraNS. [Electron. Res.]: <http://lca.epfl.ch/projects/trans/>.
55. Rudometov S. V., Sokolova O. D. Modelirovanie peredachi soobshchenij mezhdru dvizhushchimisya ob"ektami v transportnoj srede // Programmnye produkty i sistemy. 2019. T. 32. N 1. S. 141–145.
56. Sanguesa J.A., Fogue M., Garrido P., Martinez F., Cano J., Calafate C. A Survey and Comparative Study of Broadcast Warning Message Dissemination Schemes for VANETs // Mob. Inf. Syst. 2016.
57. Yang F., Wu N., Qiao Y., Zhou M., Su R., Qu T. Modeling and Optimal Cyclic Scheduling of Time-Constrained Single-Robot-Arm Cluster Tools via Petri Nets and Linear Programming // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020. Vol. 50. N 3. P. 871–883.
58. Alam T., Bobadilla L., Shell D. A. Space-Efficient Filters for Mobile Robot Localization from Discrete Limit Cycles // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3. N 1. P. 257–264.
59. Zhang H., Niu M. Modeling and Analysis of Long-Term Average User Throughput in Mobile Ultra Dense Networks // IEEE Wireless Communications Letters. 2019. Vol. 8. N 5. P. 1498–1501.
60. Abdel-Aziz M. K., Samarakoon S., Liu C., Bennis M., Saad W. Optimized Age of Information Tail for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in Vehicular Networks // IEEE Transactions on Communications. 2020. Vol. 68. N 3. P. 1911–1924.
61. Centenaro M., Tomasin S., Benvenuto N., Yang S. Predictive Voice-Over-Internet Protocol Fallback Over Vehicular Channels: Employing Artificial Intelligence at the Edge of 5G Networks // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2020. Vol. 15. N 2. P. 72–78.

## АНАЛИЗ СЕТЕЙ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

В. В. Шахов<sup>\*,\*\*</sup>, О. Д. Соколова<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

<sup>\*\*</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Новосибирск, Россия

---

УДК 004.738.2

DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014

Статья представляет собой обзор научных публикаций на тему моделирования и анализа беспроводных самоорганизующихся сетей, не имеющих постоянной структуры. Основные задачи функционирования таких сетей связаны со сбором информации, распространением сообщений между движущимися узлами. В статье рассматриваются различные подходы к анализу функционирования сетей, описывается применение соответствующего математического аппарата, сравниваются системы имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** нестационарные сети, модели сетей с подвижными узлами, системы массового обслуживания, имитационное моделирование.

**Введение.** В последние годы произошел большой технологический скачок, обусловленный появлением сетей связи с нестационарной топологией. Примерами таких сетей являются сети с мобильными абонентами, с узлами на транспортных средствах (VANET, Vehicle ad-hoc network), на беспилотных летающих аппаратах и др. Кроме того, топология стационарных сетей тоже может меняться из-за преднамеренных или непреднамеренных разрушающих воздействий, особенностей сетевых протоколов (ретранслятор может меняться, радиус передачи и маршруты варьируются и т. п.). Методы, используемые для решения задач в классических сетях (например, централизованная маршрутизация с иерархией заранее назначенных маршрутизаторов), в новых условиях оказываются неэффективными, необходима адаптация моделей и подходов.

Исследованиями по теме оптимизации передачи данных в нестационарных сетях занимаются как зарубежные, так и российские компании, реализуются международные научно-технические проекты. Среди актуальных задач можно выделить следующие: влияние мобильности узлов на производительность сети [1], локализация мобильных узлов [2], определение эффективной зоны покрытия передачи [3], энергоэффективность [4] и др. Одна из таких задач — улучшение качества связи между транспортными средствами и сетью Интернет. В сетях VANET роль станций, передающих информацию от движущихся объектов в сеть, выполняют объекты придорожного оборудования (RSU, road side unit). Но их недостаток в том, что они неподвижны, после установки на обочине дороги их нельзя перемещать. Следовательно, по мере изменения потока транспорта будет либо

---

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 19-01-00562-а.

недостаток, либо избыток таких объектов. По сравнению с неподвижными RSU, беспилотные летательные аппараты (БЛА) могут перемещаться в зависимости от изменения транспортного потока. В статье [5] авторы изучают проблему увеличения покрытия сети для VANET с помощью беспилотных летательных аппаратов, которые выполняют роль базовых станций. Много публикаций посвящено описанию технологий локализации беспроводных мобильных датчиков. Например, в [6] подробно описан принцип работы метода определения локализации на основе алгоритма Monte-Carlo Location.

Далее в предлагаемом обзоре анализируются публикации последних лет, в которых исследуются различные способы моделирования сетей с подвижными узлами и алгоритмы оптимизации функционирования таких сетей.

**1. Теоретико-графовые методы для решения оптимизационных задач в сетях с нестационарной топологией.** Во многих публикациях в качестве моделей нестационарных сетей рассматриваются случайные графы, гиперграфы [7–8]. Использование моделей и алгоритмов теории графов позволяет исследовать отношения между различными элементами в сети, решать задачи оптимизации передачи данных. Например, гиперграфовые модели удобны для учета интерференции в сетях с большим количеством подвижных узлов. Применение алгоритмов теории графов для решения задач в основном делится на две категории: исследование данных о мобильных пользователях для определения моделей движения и планирование функционирования сотовой сети с ресурсным спектром. В статьях [9, 10] авторы анализируют применение известных теоретико-графовых алгоритмов в некоторых задачах оптимизации функционирования мобильных сетей. Так, известная в теории графов теорема о четырех красках имеет приложения в беспроводных мобильных сетях. Топология сети, состоящая из базовых станций, моделируется плоским графом. Задача оптимизации распределения частот в сети сводится к задаче раскраски вершин графа. Алгоритм раскраски может использоваться для оптимального размещения вышек и минимизации интерференции.

Статья [11] посвящена проблеме изменения топологии связи, вызванной перемещением набора мобильных агентов. Сеть моделируется как граф кругов единичного радиуса (Unit Disk Graph, UDG) на плоскости в Евклидовом пространстве, где каждый единичный круг центрируется в узле, а топология связи задается мгновенным положением узлов. Все мобильные устройства оснащены простыми приемопередатчиками с ограниченной дальностью связи. UDG-графы позволяют компактно представить топологию сети в виде пересечения единичных кругов, а свойства этих графов используются для различных алгоритмов. Цель авторов — смоделировать все возможные топологии, которые могут быть созданы путем перемещения мобильных устройств с ограниченным диапазоном связи в двумерном пространстве при следующих предположениях: количество мобильных узлов постоянно; на каждом шаге удаляется или создается одно соединение; граф связан в любой момент времени. Показано, что с помощью комбинаторных методов можно сгенерировать все возможные топологии.

В статье [12] исследуются сети связи с узлами на крупных подвижных объектах с прогнозируемой траекторией передвижения (самолеты, поезда). Авторы рассматривают анализ модели системы связи на основе дискретно-временного подхода. Последовательность топологических изменений сети представляется в виде конечной последовательности состояний статического графа, каждое последующее состояние отличается от предыдущего на некоторое приращение  $\Delta$ . Изменения в топологии графа определяются параметрами движения узлов сети и характеристиками каналов связи между узлами. Авторы исполь-

зуют понятие „граф, эволюционирующий по определенному закону“, (в англоязычной литературе подобный термин — *evolving graph*). Протокол маршрутизации должен обеспечивать поиск альтернативных маршрутов при переходе системы связи из одного топологического состояния в другое. Авторы показали, что использование модели дискретного времени и модели, основанной на методах теории случайных графов, недостаточно корректно для описания систем связи, в которых в качестве узлов используются крупные подвижные объекты. Была предложена модель „мерцающего“ графа, в которой менялись каналы, пригодные для передачи информации с заданными параметрами качества. Такая же модель на основе эволюционирующего графа применяется авторами статьи [13] для оптимизации функционирования сетей VANET. Предложен алгоритм для поиска наиболее надежного маршрута в сети от источника до пункта назначения. Фиксируются изменяющиеся характеристики топологии автомобильной сети и заранее определяются надежные маршруты для поддержки качества обслуживания в процессе маршрутизации.

**2. Марковские процессы.** Для решения некоторых важных прикладных проблем не возникает необходимости анализировать поведение всей сети с мобильными узлами, достаточно рассмотреть поведение системы в некоторой окрестности, представляющей интерес для исследователя. Например, область покрытия приемопередатчика, которым оснащено устройство придорожной инфраструктуры [14], сегменты дорог, где действуют преднамеренно созданные помехи [15], зона повышенного загрязнения воздуха [16] и т. д. В этом случае для анализа различных показателей эффективности сети используется теория случайных процессов, в которой особое место занимают Марковские цепи с непрерывным временем, поскольку они позволяют достаточно точно описывать поведение реальных систем, и, кроме того, для них хорошо развит математический аппарат. В частности, при исследовании автомобильных сетей (VANET, V2X, IoV) часто используются Пуассоновские потоки событий [17–19], под действием которых происходят переходы из одного состояния Марковской цепи в другое. С использованием Пуассоновского процесса моделируются и потоки транспортных средств, и потоки передаваемых пакетов данных.

Пуассоновский процесс наблюдается при весьма распространенных условиях [20]. Пусть  $N(t)$  — число объектов (пакетов, требований на обслуживание, мобильных узлов и т. п.), поступивших в рассматриваемую систему на временном интервале  $(0; t)$ . Предположим, что  $N(0) = 0$ . Обозначим через  $\lambda$  некоторую положительную константу. Сформулируем указанные условия.

1)  $\forall t_1, t_2, t_3, t_4 : t_1 < t_2 < t_3 < t_4$  , числа  $N(t_2 - t_1)$  и  $N(t_4 - t_3)$  являются независимыми.

2) Вероятность, отражающая число объектов, поступивших в систему на некотором интервале  $(t; t + \Delta)$ , зависит только от длины  $\Delta$  и не зависит от начала интервала  $t$ .

3) Для достаточно малого  $\Delta$  выполняются следующие равенства для вероятностей событий:

$$\begin{aligned} P[N(t + \Delta) - N(t) = 1] &= \lambda\Delta + o(\Delta) \\ P[N(t + \Delta) - N(t) = 0] &= 1 - \lambda\Delta + o(\Delta) \\ P[N(t + \Delta) - N(t) > 1] &= o(\Delta) \end{aligned} \quad ,$$

( $\Delta$ )

где  $o(\Delta)$  — функция, удовлетворяющая условию:



$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{o(\Delta)}{\Delta} = 0.$$

Условие 3) означает, что вероятность поступления в систему более одного объекта за достаточно малое время пренебрежимо мала, имеет смысл учитывать лишь вероятности отсутствия поступлений в систему и поступления одного требования. Если указанные условия выполнены, то поток объектов в систему является Пуассоновским, случайная величина  $N(t)$  распределена следующим образом:

$$p[N(t) = n] = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, n \geq 0.$$

При этом случайная величина  $i$ , характеризующая интервалы между соседними поступлениями, будет иметь экспоненциальное распределение с плотностью:

$$f_i(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Верно и обратное: если время между соседними поступлениями распределено по экспоненциальному закону, то количество поступлений за некоторое время соответствует распределению Пуассона. Крупномасштабные экспериментальные исследования современных реальных сетей с подвижными узлами подтвердили обоснованность применения экспоненциального распределения [21–23] и соответствующих математических инструментов, среди которых выделяются Марковские модели очередей, которые традиционно используются для анализа телекоммуникационных систем.

В настоящее время теория очередей или теория систем массового обслуживания (СМО) активно применяется при исследовании и разработке сетей с мобильными узлами, в частности, технологий Multi-access Edge Computing (MEC), которые играют ключевую роль для развития сетей 5G и Интернета вещей [24]. Концепция MEC была предложена группой отраслевых спецификаций (ISG, Industry Specification Group) Европейского института телекоммуникационных стандартов (ETSI, European Telecommunications Standards Institute) в 2014 г. с целью разрешить противоречие между ресурсоемкими приложениями, используемыми мобильными пользователями, и ограниченными ресурсами мобильных терминалов [25]. В основе концепции MEC лежит предложение делегировать выполнение большей части пользовательских вычислительных задач MEC серверам, находящимся в непосредственной близости от мобильных пользователей. В результате не только ускорится выполнение запросов пользователей, усилятся возможности для обеспечения их конфиденциальности, уменьшится энергопотребление пользовательских устройств терминалов, но также существенно снизится объем передаваемого трафика в локальных и опорных сетях и, следовательно, соответствующие расходы. Следует отметить, что изначально аббревиатура MEC расшифровывалась как Mobile Edge Computing, но в 2016 г. на всемирном конгрессе MEC, где были представлены основные положения концепции, по инициативе ISGETSI „Mobile“ заменили на „Multi-access“ для того, чтоб отразить возрастающий интерес к MEC со стороны несотовых операторов. И уже с новым названием концепция MEC была включена в стандарт 5G консорциумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project), разрабатывающим протоколы для мобильной связи [26].

Наиболее часто в исследованиях по тематике MEC используется простейшая Марковская цепь с непрерывным временем, описывающая поведение СМО, обозначаемой, согласно классификации по Кендалу, как M/M/1, т. е. на вход системы поступает Пуассоновский

поток запросов пользователей, время обслуживания поступивших запросов предполагается экспоненциальным, в системе имеется одно устройство для обслуживания запросов, очередь для запросов, ожидающих обработки, считается неограниченной. Подробное описание свойств данной системы и классификацию СМО по Кендалу можно найти, например, в монографии [27]. С помощью системы М/М/1 моделируется функционирование МЕС сервера:

- при исследовании стратегии разгрузки МЕС сервера [25] в ультраплотных сетях (ultra-dense network [28]);
- для сравнительного анализа задержки и стоимости обработки пользовательских запросов в автомобильных сетях, когда используются разные способы организации связи: V2V, V2I и их комбинации [29];
- для оптимизации предложенной нагрузки и вычислительной мощности облачных вычислительных систем с вертикальной и горизонтальной загрузкой [30];
- для одновременной оптимизации энергопотребления и задержки в приложениях IoT [31];
- при решении задачи размещения МЕС серверов [32];
- для оптимизации трехмерного развертывания МЕС серверов, установленных на беспилотных летательных аппаратах [33];
- при разработке двухуровневой иерархической архитектуры МЕС, с использованием технологий оптических и беспроводных сетей, а также эффективного механизма оркестровки разгрузки серверов для улучшения QoE мобильных пользователей [34].

Также имеется множество других недавних публикаций, где для оптимизации МЕС технологий используется СМО вида М/М/1, например [35–38].

Некоторое развитие данный подход получил в статье [39], где рассматривается функционирование роя беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Из соображений энергосбережения вычисления проводят не все участники роя аппаратов, для этого на некоторых БЛА развернуты МЕС сервера, функционирующие в режиме виртуальных машин для обеспечения множественного доступа. Для моделирования виртуальной машины используется СМО вида М/М/п.

В последнее время исследователи отмечают, что предположение об экспоненциальном законе распределения времени вычисления задачи МЕС сервером не всегда соответствует действительности, выводы на основе данного предположения могут потенциально привести к нарушению качества обслуживания [40]. Для моделирования функционирования МЕС сервера и обслуживания IoT приложений предлагается использовать СМО вида М/G/1 [40–43].

**3. Имитационное моделирование для тестирования алгоритмов и моделей нестационарных сетей.** Для исследования многих проблем распространения информации и сбора данных в сетях с подвижными узлами широко применяется имитационное моделирование [44–46]. Авторы публикаций отмечают, что симуляторы для транспортных сетей VANET отличаются от симуляторов для мобильных одноранговых сетей MANET, они имеют разные характеристики и разную архитектуру, т. к. в сетях VANET быстро меняется топология сети, узлы движутся с высокими скоростями. В обзоре [46] представлено подробное сравнение различных общедоступных комплексов программ для моделирования функционирования сетей VANET: VANET MobSim, SUMO, CityMob и некоторых других. Описаны характеристики программного обеспечения, графический интерфейс пользователя, требования к вводу, возможность визуализации вывода, точность моделирования.

Авторы считают, что только система Vanet MobiSim обеспечивает хорошую поддержку трассировки, а симулятор CityMob отличается от других лучшим функционалом, в частности поддержкой модели трафика.

Для создания реалистичных сценариев обмена информацией между транспортными средствами требуется система имитационного моделирования, в которой реализованы сценарии, когда подвижные узлы могут безопасно и эффективно передавать данные. Очевидно, что система должна поддерживать как средства имитации движения транспорта, так и средства имитации передачи данных в сети.

Основная функция **симулятора движения** заключается в предоставлении точной модели мобильности каждого транспортного средства, а также взаимодействия между ними в виртуальной транспортной среде, чтобы можно было получить информацию о дорожном движении в каждый момент времени [47, 48]. Для моделирования мобильности транспортных средств можно использовать различные подходы. Например, для моделирования сетей широко используется случайное равномерное распределение узлов в некоторой области. Но эти шаблоны не очень подходят для сетей VANET, т. к. транспортные средства движутся не случайным образом, а по известным траекториям и дорогам. Более удачное предложение — использовать модели потока, т. е. рассматривать поведение транспортных средств во взаимодействии с соседями и окружающей средой. Также находят применение модели движения, при которых учитываются все факторы окружающей среды, светофоры, конечный маршрут следования транспортного средства.

Как правило, симулятор движения состоит из трех основных компонентов: ограничение движения (дороги, перекрестки, ограничения скорости и др.), генератор трафика (создание поездок, схема мобильности) и интерфейс (инструменты визуализации, программная платформа, интерфейс с другим программным обеспечением). Наиболее известные симуляторы транспортной мобильности — это VISSIM [49], Vanet MobiSim [50] и SUMO [51]. VISSIM — это программное обеспечение для моделирования транспортных потоков на основе микроскопических интервалов, поддерживает 3D-визуализацию состояния трафика в режиме реального времени. Vanet MobiSim — это агентный симулятор автомобильного движения, может поддерживать реалистичные модели движения как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровне. SUMO (Simulation of Urban MObility) — симулятор движения с открытым исходным кодом, реализует моделирование на основе непрерывного в пространстве и дискретного во времени движения транспортного средства. SUMO также может считывать сети из других симуляторов трафика и позволяет внешнему приложению подключаться к моделированию и взаимодействовать с ним через общий интерфейс управления трафиком, что может сделать возможным соединение имитаторов трафика и сетевых имитаторов.

Симуляторы **передачи данных** обычно используются для моделирования и тестирования производительности сетевых протоколов. Самые популярные системы с открытым исходным кодом — это NS-3 [52] и OMNeT++ [53] — основаны на ядре моделирования дискретных событий. NS-3 — это симулятор сети с дискретными событиями, он является преемником известного симулятора NS-2 и поддерживает как проводные, так и беспроводные сети и, в частности, импортировал множество функций, подходящих для сетей VANET, например, реализацию моделей мобильности транспортных средств.

Среда моделирования передачи данных в сети с меняющейся топологией — это среда, которая интегрируется как с генератором изменения топологии, так и с симулятором сети. Например, среда TraNs [54] использует SUMO в качестве инструмента генерато-

ра мобильности и NS-2 в качестве сетевого симулятора, тем самым обеспечивая связь между поведением транспортного средства и моделью мобильности. В статье [55] представлена система имитационного моделирования на основе системы MTSS (Manufacturing and Transportation Simulation System). Система была разработана для имитации передачи сообщений подвижными приемопередающими модулями ограниченной мощности (как следствие — ограниченного радиуса действия). Использовались различные имитационные визуально-интерактивные модели участков дорожной инфраструктуры (на основе данных сервиса OpenStreetMap). В качестве результатов моделирования представлено влияние интерференции на распространение радиосигналов в плотной конфигурации сети VANET (например, большая загруженность на дороге в 8–10 рядов). Показано, что для дорог с меньшей шириной влияние интерференции незначительно. Следует отметить, что во многих публикациях по исследованиям сетей VANET [56] отмечается проблема конфликтов на уровне канала из-за чрезмерного количества ширококвещательных пакетов (broadcast storm problem) при одновременной трансляции сообщения сразу несколькими передатчиками. Проведенные с помощью системы MTSS тестирования ширококвещательной рассылки сообщений на различных топологиях подтверждают эту проблему.

**Заключение.** Представленный в данном обзоре инструментарий не покрывает, конечно, всех методов, используемых для анализа сетей с нестационарной топологией. Они очень разнообразны, включают, например, подход на основе сетей Петри и линейного программирования [57], конечные автоматы [58], стохастическую геометрию [59], невыпуклую оптимизацию [60] и т.д. В последнее время набирают популярность методы машинного обучения [61]. Однако рассмотренные в этом обзоре подходы являются наиболее часто используемыми и будут оставаться таковыми в обозримой перспективе.

## Список литературы

1. Wu X. A Hybrid View of Mobility in MANETs: Analytical Models and Simulation Study // *Computer Comm.* 2008. Vol. 31. N. 16. P. 3810–3821.
2. Barani, H., Fathy, M. An Algorithm for Localization in Vehicular Ad-Hoc Networks. // *Journal of Computer Science.* 2010. Vol. 6. N 2. P. 168–172.
3. Liu C., Yang O., Li G, Shu Y. Effective Transmission Coverage Area-Based Link Dynamics Characterization of VANET in Highway Scenario // *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 2015. Vol. 11. N 10.
4. Elhoseny M., Shankar K. Energy Efficient Optimal Routing for Communication in VANETs via Clustering Model. // *Emerging Technologies for Connected Internet of Vehicles and Intelligent Transportation System Networks. Studies in Systems, Decision and Control.* 2020. Vol. 242.
5. Liu T., Zhao L., Li B., Zhao C. Research on the Enhancement of VANET Coverage Based on UAV // Liang Q., Wang W., Liu X., Na Z., Jia M., Zhang B. (eds) *Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS.* 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 571. Springer, Singapore.
6. Qiu, Z., Wu, L., Zhang, P. An Efficient Localization Method for Mobile Nodes in Wireless Sensor Networks // *International Journal of Online Engineering.* 2017. Vol. 13. N 3.
7. Sokolova O., Yurgenson A. Using graph, hypergraph, and hypernet models for network analysis problems // *Proc. 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST),* 2012.
8. Reddy A. R., Venkatesh D., Ramesh K. Hypergraph Interference Models in Wireless Ad-Hoc Networks with Low Complexity Distributed Scheduling // *International journal of scientific research.* 2012. 2. P. 237–240.
9. Webb J., Docemmilli F., Bonin, M. Graph Theory Applications in Network Security // *ArXiv.2015. abs/1511.04785.*

10. Yang L., Yu Y. H. A Mobile Frequency Allocation Algorithm Based on the Graph Theory // International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. 2015.
11. Goldin D., Attia S. A. Unit Disk Graph Based Modelling of a Network of Mobile Agents // Proceedings of the First IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems. Venice, Italy. 2009.
12. Сорокин А. А., Дмитриев В. Н. Описание систем связи с динамической топологией сети при помощи модели „мерцающего графа“ // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 134–139.
13. Eiza M. H., Ni Q. An Evolving Graph-Based Reliable Routing Scheme for VANETs // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2013. Vol. 62. N. 4. P. 1493–1504.
14. Liu K., Ng J. K. Y., Lee V. C. S., Son S. H., Stojmenovic I. Cooperative Data Scheduling in Hybrid Vehicular Ad Hoc Networks: VANET as a Software Defined Network // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2016. Vol. 24. N 3. P. 1759–1773.
15. Mokdad, L., Ben-Othman, J., Nguyen, A.T. DJAVAN: Detecting jamming attacks in Vehicle Ad hoc Networks // Performance Evaluation. 2015. Vol. 87. P. 47–59.
16. Shakhov V., Sokolova O. Towards Air Pollution Detection with Internet of Vehicles // 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems, Novosibirsk, Russia, 2019, P. 183–186.
17. Deng D., Lien S., Lin C., Hung S., Chen W. Latency Control in Software-Defined Mobile-Edge Vehicular Networking // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. N 8, P. 87–93.
18. Zhou S., Sun Y., Jiang Z., Niu Z. Exploiting Moving Intelligence: Delay-Optimized Computation Offloading in Vehicular Fog Networks // IEEE Communications Magazine. 2019. Vol. 57. N 5. P. 49–55.
19. Zhou Z., Yu H., Xu C., Chang Z., Mumtaz S., Rodriguez J. BEGIN: Big Data Enabled Energy-Efficient Vehicular Edge Computing // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. N 12. P. 82–89.
20. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989.
21. Zhu H., Fu L., Xue G., Zhu Y., Li M., NiL. M. Recognizing Exponential Inter-Contact Time in VANETs // Proceedings IEEE INFOCOM, San Diego, CA, 2010. P. 1–5.
22. Jiang R., Zhu Y., Yang Y. Improving Throughput and Fairness of Converge cast in Vehicular Networks // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2017. Vol. 16. N 11. P. 3070–3083.
23. Li Y., Jin D., Hui P., Chen S. Contact-aware data replication in roadside unit aided vehicular delay tolerant networks // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2016. Vol. 15. N 2. P. 306–321.
24. Liu Y., Peng M., Shou G., Chen Y., Chen S. Toward Edge Intelligence: Multiaccess Edge Computing for 5G and Internet of Things // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7. N 8. P. 6722–6747.
25. Guo H., Liu J., Zhang J. Computation Offloading for Multi-Access Mobile Edge Computing in Ultra-Dense Networks // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. N 8. P. 14–19.
26. Mao Y., You, C. Zhang J., Huang K., Letaief K. B. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19. N 4. P. 2322–2358.
27. Крылов В. В., Самохвалова С. С. Теория телетрафика и ее приложения // СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
28. Hashim M. F., Abdul Razak, N. I. Ultra-Dense Networks: Integration with Device to Device (D2D) Communication // Wireless Personal Communications. 2019. Vol. 106. P. 911–925.
29. Zhang K., Mao, Y. Leng S., He Y., Zhang Y. Mobile-Edge Computing for Vehicular Networks: A Promising Network Paradigm with Predictive Off-Loading // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2017. Vol. 12. N 2. P. 36–44.
30. Thai M., Lin Y., Lai Y., Chien H. Workload and Capacity Optimization for Cloud-Edge Computing Systems with Vertical and Horizontal Offloading // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2020. Vol. 17. N 1. P. 227–238.

31. Cui L., Xu C., Yang S., Huang J. Z., Li J., Wang X., Ming Z., Lu N. Joint Optimization of Energy Consumption and Latency in Mobile Edge Computing for Internet of Things // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. P. 4791–4803.
32. Chen Y., Sun Y., Feng T., Li S. A Collaborative Service Deployment and Application Assignment Method for Regional Edge Computing Enabled IoT // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 112659–112673.
33. Islambouli R., Sharafeddine S. Optimized 3D Deployment of UAV-Mounted Cloudlets to Support Latency-Sensitive Services in IoT Networks // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 172860–172870.
34. Ebrahimzadeh A., Maier M. Cooperative Computation Offloading in FiWi Enhanced 4G HetNets Using Self-Organizing MEC // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19. N 7. P. 4480–4493.
35. Wang S., Zhang X., Yan Z., Wenbo W. Cooperative Edge Computing With Sleep Control Under Nonuniform Traffic in Mobile Edge Networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. N 3. P. 4295–4306.
36. Hajipour J. Stochastic Buffer-Aided Relay-Assisted MEC // *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24. N 4. P. 931–934.
37. Doan T. V., You D., Salah H., Nguyen G. T., Fitzek H. P. F. MEC-assisted Immersive Services: Orchestration Framework and Protocol // *IEEE Intern. Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, Jeju, Korea (South), 2019. P. 1–6.
38. Wu S., Xia W., Cui W., Chao Q., Lan Z., Yan F., Shen L. An Efficient Offloading Algorithm Based on Support Vector Machine for Mobile Edge Computing in Vehicular Networks // *10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Hangzhou. 2018. P. 1–6.
39. Zhang Q., Chen J., Ji L., Feng Z., Han Z., Chen Z. Response Delay Optimization in Mobile Edge Computing Enabled UAV Swarm // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69. N 3. P. 3280–3295.
40. Belogaev A., Elokhin A., Krasilov A., Khorov E., Akyildiz I. F. Cost-Effective V2X Task Offloading in MEC-Assisted Intelligent Transportation Systems // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 169010–169023.
41. Zhou Z., Yu S., Chen W., Chen X. CE-IoT: Cost-Effective Cloud-Edge Resource Provisioning for Heterogeneous IoT Applications // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. N 9. P. 8600–8614.
42. Nguyen M. N. H., Zaw C. W., Kim K., Tran N. H., Hong C. S. Let's Share the Resource When We're Co-Located: Co-location Edge Computing // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69. N 5. P. 5618–5633.
43. Wang Y., Yang J., Guo X., Qu Z. A Game-Theoretic Approach to Computation Offloading in Satellite Edge Computing // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 12510–12520.
44. Al-Mayouf Y. R. B., Ismail M., Abdullah N. F., Al-Qaraawi S. M., Mahdi O. A. Survey on VANET technologies and simulation models // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. N 15. P. 9414–9427.
45. Jukic Z., Arshad M. Review of Simulation Based Comparison of VANET Protocols // *New Technologies, Development and Application*. NT 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 42. Springer.
46. Sanguesa J. A., Fogue M., Garrido P., Martinez F. J., Cano J.-C., Calafate C. T. A survey and comparative study of broadcast warning message dissemination schemes for VANETs / *Mobile Information Systems*. 2016, art.ID 8714142, 18 p.
47. Elgazzar M. M. A., Alshareef A. VANET Simulator: Full Design Architecture // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2020. Vol. 9. N 3.
48. Jia D., Lu K., Wang J., Zhang X., Shen X. A Survey on Platoon-Based Vehicular Cyber-Physical Systems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18. N 1. P. 263–284.

49. VISSIM. [Electron. Res.]: <http://www.ptv-vision.com/en-uk/products/vision-traffic-suite/ptv-vissim/overview/>.
50. Harri J., Fiore M., Bonnet F. Vehicular mobility simulation with Vanet MobiSim // Simulation. 2009. Vol. 87. N 4. P. 275–300.
51. Behrisch M., Bieker L., Erdmann J., Krajzewicz D. SUMO simulation of urban Mobility-an overview // in Proc. 3rd Int. Conf. Adv. Syst. SIMUL. 2011. P. 63–68.
52. NS-3. [Electron. Res.]: <https://www.nsnam.org/>.
53. Omnetpp. [Electron. Res.]: [www.omnetpp.org](http://www.omnetpp.org).
54. TraNS. [Electron. Res.]: <http://lca.epfl.ch/projects/trans/>.
55. Рудометов С. В., Соколова О. Д. Моделирование передачи сообщений между движущимися объектами в транспортной среде // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 1. С. 141–145.
56. Sanguesa J. A., Fogue M., Garrido P., Martinez F., Cano J., Calafate C. A Survey and Comparative Study of Broadcast Warning Message Dissemination Schemes for VANETs // Mob. Inf. Syst. 2016.
57. Yang F., Wu N., Qiao Y., Zhou M., Su R., Qu T. Modeling and Optimal Cyclic Scheduling of Time-Constrained Single-Robot-Arm Cluster Tools via Petri Nets and Linear Programming // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020. Vol. 50. N 3. P. 871–883.
58. Alam T., Bobadilla L., Shell D. A. Space-Efficient Filters for Mobile Robot Localization from Discrete Limit Cycles // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3. N 1. P. 257–264.
59. Zhang H., Niu M. Modeling and Analysis of Long-Term Average User Throughput in Mobile Ultra Dense Networks // IEEE Wireless Communications Letters. 2019. Vol. 8. N 5. P. 1498–1501.
60. Abdel-Aziz M. K., Samarakoon S., Liu C., Bennis M., Saad W. Optimized Age of Information Tail for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in Vehicular Networks // IEEE Transactions on Communications. 2020. Vol. 68. N 3. P. 1911–1924.
61. Centenaro M., Tomasin S., Benvenuto N., Yang S. Predictive Voice-Over-Internet Protocol Fallback Over Vehicular Channels: Employing Artificial Intelligence at the Edge of 5G Networks // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2020. Vol. 15. N 2. P. 72–78.



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

РАН, доцент 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.



**Соколова Ольга Дмитриевна**, e-mail: [olga@rav.sccc.ru](mailto:olga@rav.sccc.ru) — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Научные

интересы: математическое моделирование, со-

временные сети передачи данных, беспроводные сенсорные сети, задачи оптимизации.

**Olga Sokolova** is a Senior Researcher of Institute of Computational Mathematics and

Mathematical Geophysics (ICMMG SB RAS). PhD in computer science. Research interests: modern data networks, wireless sensor networks.

*Дата поступления — 09.10.2020*