

# Анализ возраста информации как метрики качества обслуживания в системах мониторинга промышленного интернета вещей\*

Е.Г. МЕДВЕДЕВА<sup>I,II</sup>, Э.Р. ЗАРИПОВА<sup>I,III</sup>, Е.В. МАРКОВА<sup>II,IV</sup>

<sup>I</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Россия

<sup>II</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>III</sup> Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Московский ордена Почета университет Министерства внутренних дел Российской Федерации им. В.Я. Кикотя», г. Москва, Россия

<sup>IV</sup> Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Критически важной функцией для приложений массовой машинной связи (mMTC) и сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC) в сетях 5G является своевременная доставка обновлений состояния от удаленных объектов в центр управления. Для оценки эффективности таких систем используется метрика «возраст информации» (Age of Information, AoI), отражающая актуальность данных на приемной стороне. В данной работе представлена концептуальная модель системы мониторинга промышленного Интернета вещей, включающая каналы передачи и узлы обработки данных от конечных устройств до центра управления. Формализован процесс генерации, передачи и обработки обновлений, введены обозначения для составляющих полной задержки доставки. На основе предложенной модели даны строгие определения случайных процессов возраста информации (AoI) и пикового возраста информации (PAoI) как функций времени. Показана взаимосвязь данных метрик с теорией массового обслуживания, что создает основу для их дальнейшего аналитического и имитационного исследования.

**Ключевые слова:** теория массового обслуживания, качество обслуживания, возраст информации, сети 5G.

**DOI:** 10.14357/20790279260210 **EDN:** ZRFEMQ

## Введение

Рост приложений Интернета вещей за последнее десятилетие породил развитие ряда технологий, поддерживающих трафик небольших объемов данных. Основываясь на ограничениях по задержке и требованиях к надежности приложений [1], в системах 5G эти технологии определены как массовая машинная связь (massive Machine-Type Communications, mMTC) и сверхнадежная связь с низкой задержкой (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) [2], и многие технологии для mMTC, разработанные до появления стандартов 5G (включая LoRaWAN [3, 4], SigFox, Wi-Fi

Halow, EC-GSM-IoT, LTE-M [5, 6]), а также системы класса 5G, такие как NB-IoT и DECT-2020 [7], уже получили широкое распространение.

Интерес представляет работа таких приложений mMTC и URLLC, в которых происходит либо обмен сообщениями между конечными устройствами, либо отправка устройства своего обновления в центр управления напрямую [8–10]. Например, синхронизация между роботами, выполняющими совместные действия на производственной линии, состоит в передаче актуальной информации [11]. Эта технология также находит применение в системах дистанционного контроля и мониторинга автомобильного движения и городского перемещения, или в энергосетях, где есть необходимость для своевременной доставки

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-19-00804, <https://rscf.ru/en/project/24-19-00804/>.

информации. Устройства под управлением протоколов верхнего уровня, например, SCADA [12], поддерживают непрерывные RRC-соединения и опрашиваются по таймеру. Такой режим порождает на радиоинтерфейсах трафик с групповым прибытием заявок, что создает критическую нагрузку на систему, изначально рассчитанную на случайные потоки. При этом, пороговые значения времени отклика для большинства задач в энергосетях значительно ниже, чем предписывает спецификация 5G (ITU-R M.2410).

Ранее производительность критичных ко времени приложений оценивалась параметром задержки доставки сообщений [13, 14], зависящим напрямую от интенсивности потока заявок в сети, в частности – сообщений на передающей стороне. В 2011 году была введена метрика *возраст информации* (Age of Information, AoI), которая отражает степень актуальности данных удаленных систем [15]. Благодаря AoI появляется возможность более точно оценивать работу приложений mMTC и URLLC, используя ее как индикатор качества обслуживания (QoS).

В отличие от задержки передачи, определяемой интервалом между отправкой пакета источником и его получением адресатом, возраст информации отсчитывается с момента генерации последнего полученного обновления. Такое определение требует учета случайного характера временных интервалов, что делает анализ существенно более сложным и вынуждает в исследованиях ограничиваться простейшими моделями массового обслуживания.

С практической точки зрения, упрощение модели не всегда идет на пользу проводимому анализу, в котором требуется учесть среду передачи и специфику процессов поступления и обработки пакетов данных, когда дисциплина обслуживания может зависеть от состояния каналов пользователей, а само обслуживание может быть многоэтапным (например, произвольный доступ с последующей передачей данных, как это часто реализовано в сотовых технологиях mMTC, включая LTE-M и NB-IoT). В настоящее время между теоретическими исследованиями и практическим применением моделей, разработанных для AoI, сохраняется значительный разрыв, о чем подробнее упоминается в [16]. Одним из путей преодоления этого разрыва является использование имитационного моделирования, позволяющего учесть ограниченность вычислительных ресурсов конечных устройств [17], а также применение современных методов оптимизации для настройки параметров системы [18].

## 1. Возраст информации в системе мониторинга

В качестве примера рассмотрим систему мониторинга промышленного Интернета вещей, предназначенного для таких задач, как отслеживание состояния и управление заводскими станками. Допустим, что станки оснащены конечными устройствами (КУ), которые регулярно измеряют параметры влажности, температуры, вибрации, и другие, и передают данные центру управления (ЦУ) (см. рис. 1). КУ связаны по беспроводной сети с удаленным центром управления (ЦУ) через базовую станцию (БС), ЦУ использует информацию для (а) анализа динамики работы каждого станка в течение длительного периода в диагностических целях [19] и (б) в случае аварийной ситуации – для принятия решения и отправки управляющей команды станку с целью оперативного изменения режима его работы [20]. В случае (а) база данных ЦУ должна хранить все кортежи, полученные в течение интервала мониторинга, тогда как в случае (б) хранится только последний кортеж, который содержит набор самых последних показаний, полученных ЦУ, а также моменты времени, когда устройство выполнило измерения. Следовательно, в случае (б) достаточно предварительно удалить предыдущие данные от этого КУ, хранящиеся в базе данных ЦУ, и заменять их свежими данными.

В случае (а) ЦУ заинтересован во всей информации, полученной от множества КУ, тогда как в случае (б) ЦУ интересуется только самая свежая и наиболее точная информация от каждого КУ, так называемые информационные сообщения. В то же время в первом случае менее актуальные неинформативные пакеты могут быть доставлены по назначению, и существует ряд алгоритмов для применения этих вариантов использования, например, цифровые двойники [21], то есть реплики сложных систем, работающих в реальном времени, и их оперативное управление на основе простого мониторинга. Общим требованием для всех перечисленных приложений является своевременное обновление информации в ЦУ, поэтому основная задача системы сводится к минимизации времени доставки обновлений от КУ-источника до ЦУ.

На рис.1 реализована схема удаленного контроля, где КУ подключены к ЦУ с помощью беспроводных технологий, в частности 5G. Модель системы включает в себя конечное число  $N$  устройств, передающих обновления, беспроводной канал связи link1, БС с планировщиком для опроса конечных устройств, высокоскоростной канал связи оператора link2, шлюз подключения

к Интернету, высокоскоростной канал связи link3, ЦУ с управляющей функцией и базой данных для хранения обновлений. В данной модели ЦУ – это элемент контура обратной связи, включающий монитор, управляющую функцию и исполнительное устройство. Монитор ведет базу данных, на основе его показаний управляющая функция решает, нужно ли влияние, и отправляет команду исполнительному устройству (например, на заводе – меняет режим станка или периодичность опроса). Командой также может быть порядок опроса КУ через планировщик. Задержка передачи в канале link1 включает сериализацию, распространение сигнала и время обработки на БС. Планировщик на БС решает, какие устройства опрашивать, и отправляет обновления. Базовая станция хранит их до передачи по link2 к шлюзу (с сериализацией). Модель учитывает обработку шлюзом, передачу по link3 и финальную обработку в ЦУ.

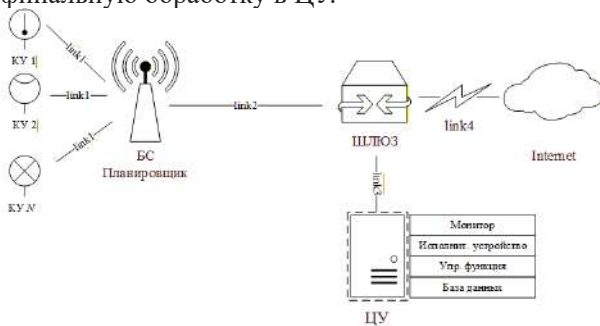


Рис. 1. Система мониторинга показателей

Одной из задач исследования является разработка алгоритма для планирования порядка опроса устройств, правила выбора обновлений, поставленных в очередь на передачу в ЦУ. Для решения этой задачи полезна следующая информация, доступная на стороне ЦУ после обработки обновления: время измерения на стороне КУ (может совпадать с моментом генерации обновления); набор данных по измеренным параметрам (температура, влажность, вибрация и пр.); время окончания обработки обновления в ЦУ. Будем считать, что каждое обновление сохраняется в базе данных ЦУ в виде кортежа из четырех параметров:

$i$  – индекс КУ,

$t^{(i)}$  – время генерации обновления на КУ

$r^{(i)}$  – набор  $r_k^{(i)}$  показаний (например,  $r_1^{(i)}$  – температура,  $r_2^{(i)}$  – влажность и др.),

$t'^{(i)}$  – время окончания обработки обновления в ЦУ.

Таким образом кортеж  $\mathbf{r}(i) := [i, t^{(i)}, r^{(i)}, t'^{(i)}]$  для  $i$ -го КУ позволяет блоку мониторинга в ЦУ в любой момент времени оценить устаревание данных, содержащихся в третьем параметре  $\mathbf{r}(i)$ . А

$t'^{(i)}$  фиксирует исходные данные для эффективной работы планировщика ЦУ.

## 2. Модель процедуры мониторинга с одним конечным устройством

Для систем с одним конечным устройством ( $N=1$ ) актуальность информации, которая хранится в базе данных ЦУ определяется длиной интервала времени, прошедшим с момента измерения параметра  $r_k^{(i)}$  на КУ. На рис. 2 изображена процедура передачи обновления информации в ЦУ от момента измерения показаний до завершения обработки соответствующего пакета обновления с использованием следующих обозначений:

$n$  – номер обновления,

$t_n$  – момент времени генерации КУ обновления  $n$ ,  
 $t'_n$  – время окончания обработки  $n$ -обновления в ЦУ,

$\xi_0$  – интервал времени от измерения показания  $r_k$  до начала передачи первого бита (обновления  $n$ ),  
 $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – с.в. времени передачи по каналам link1, link2 и link3 соответственно,

$\xi_4, \xi_5, \xi_6$  – с.в. времени обработки обновления устройствами с учетом получения и записи данных обновления,

$T_n = \sum_{j=1}^6 \xi_j$  – общее время доставки обновления  $n$  (см. рис. 2).

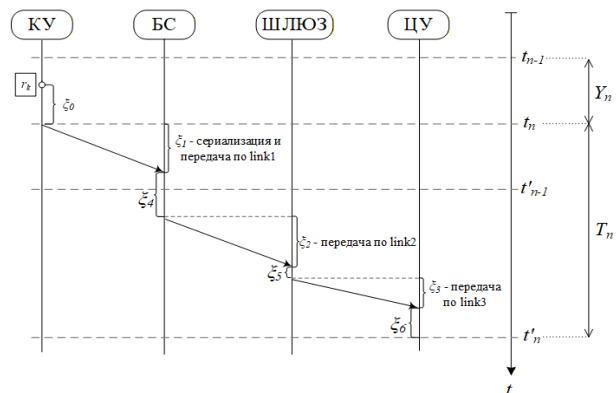


Рис. 2. Процедура обновления информации

Важно отметить, что и возраст информации, и пиковый возраст информацию (PAoI) являются случайными величинами (с.в.). Для проведения анализа необходимо знать распределение каждой из с.в.  $\xi_j$ , что в общем случае усложняет работу. Наиболее трудоемким является определение составляющих задержки доставки обновления в узлах маршрута с.в.  $\xi_4, \xi_5, \xi_6$ . В [22] эта задача решена с помощью анализа общего времени пребывания заявки в СМО G/G/1, являющейся моделью для каждого узла маршрута.

Кроме того, задержка  $T_n$  по определению суммы задержек содержит время передачи  $\xi_1$  по каналу link1 от ЦУ до БС, зависящее от множества факторов, среди которых:

- условие радиоканала (расстояние, помехи, затенения);
- схема множественного доступа;
- организация ресурсов (временное/частотное или ортогональное частотное мультиплексирование);
- тип планировщика на базовой станции.

Момент времени  $t'_n$ , совпадающий с концом цикла, когда информация из  $n$ -го обновления полностью обработана, хранится в базе данных как часть кортежа обновления  $\mathbf{r} = [i, r_k, t']$  для последующего расчета возраста информации и пикового возраста информации.

Перейдем к построению математической модели и дадим определение изучаемых метрик как функций времени на узле ЦУ в случайный момент  $t, t \geq 0$ , тогда согласно [23] возраст информации:

$\Delta(t) = t - t_m$ , где

$m = \sup \{n: t'_n \leq t\}, n \geq 1, m \geq 1$ , и пиковый возврат информации, как последовательность от  $n$ :

$$A_n = \Delta(t'_n - 0) = t'_n - t_{n-1} = A(t), n \geq 1.$$

Заметим, что  $\Delta(t), t \geq 0$  является случайным процессом с непрерывным временем над непрерывным пространством состояний  $\mathbb{R}$ . Более того, процесс  $A(t)$  представляет собой ступенчатый случайный процесс со скачками, которые происходят в конце обработки обновления на стороне ЦУ. Состояние  $A(t)$  не изменяется до тех пор, пока не будет обработано обновление  $(n + 1)$ . И соответствующая марковская цепь  $A_n$  вложена в  $\Delta(t)$  по моментам времени сразу за  $t'_n$ .

Большинство теоретических исследований исследует системы с одним сервером либо в дискретном, либо в непрерывном времени. Более ранние исследования в основном основаны на вырожденных моделях с точки зрения количества источников, процессов поступления и обслуживания, количества серверов и дисциплины массового обслуживания. В частности, в [24] изучены модели M/M/1, M/D/1 и D/M/1 с дисциплиной FCFS (первым пришел – первым обслужен). Авторы для расчета скорости передачи по каналу link1, определили длительность между обновлениями верхней границей на приемной стороне. В этой работе была введена метрика возраста информации для оценки производительности служб обновления состояния. Для рассматриваемых систем массового обслуживания авторы продемонстрировали, что существует оптимальный интервал между обновлениями в

КУ, который минимизирует среднее значение пикового возраста информации тогда, когда следующее обновление доступно точно в момент завершения обработки предыдущего.

## Заключение

В работе рассмотрена актуальная задача обеспечения своевременности доставки данных в системах мониторинга промышленного Интернета вещей, функционирующих на базе перспективных технологий сетей 5G (mMTC и URLLC). В качестве ключевого показателя качества обслуживания выбрана метрика «возраст информации» (AoI), которая, в отличие от классической задержки, позволяет комплексно оценить степень устаревания данных на стороне центра управления.

Основным результатом работы является разработка концептуальной модели системы сбора и передачи обновлений, охватывающей все этапы – от момента измерения параметров конечным устройством до фиксации обработанных данных в центре управления. Предложенная архитектура (рис. 1) детализирует маршрут прохождения информации, включая беспроводной канал link1, базовую станцию, транспортную сеть оператора (link2, link3) и узлы обработки. В ходе формализации процесса (рис. 2) выделены и обозначены основные случайные составляющие задержки, что позволяет корректно моделировать общее время доставки обновления  $T_n$ .

На основе введенных обозначений и параметров кортежа данных  $\mathbf{r}(i)$  даны строгие математические определения возраста информации  $\Delta(t)$  и пикового возраста информации  $A_n$  как случайных процессов. Анализ данных метрик естественным образом опирается на аппарат теории массового обслуживания, поскольку каждый этап обработки и передачи может быть интерпретирован как система массового обслуживания [25, 26]. Выполненный обзор литературы подтверждает, что, несмотря на значительный теоретический задел, сохраняется разрыв между аналитическими моделями и требованиями реальных промышленных систем, что обуславливает необходимость применения имитационного моделирования и методов оптимизации [17, 18].

## Литература

1. ITU-R. Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface. ITU-R Recommendation M.2410-0. Geneva, Switzerland: ITU-R, 2017.

2. Zhang J., Kang K., Yang M., Zhu H., Qian H. AoI-minimization in UAV-assisted IoT Network with Massive Devices // *Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Austin, TX, USA, 10-13 апреля 2022. P. 1290-1295. <https://doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771887>
3. Andersen F.R., Ballal K.D., Petersen M.N., Ruepp S. Ranging Capabilities of LoRa 2.4 GHz // *Proceedings of the 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Virtual, 2-16 июня 2020. P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT48130.2020.9221451>
4. Simka M., Polak L. On the RSSI-based indoor localization employing LoRa in the 2.4 GHz ISM band // *Radioengineering*. 2022. Vol. 31. No. 1. P. 135-143. <https://doi.org/10.13164/re.2022.0135>
5. ETSI. Short Range Devices; Low Throughput Networks (LTN) Architecture; LTN Architecture. ETSI TS 103 358 V1.1.1. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2018.
6. ETSI. Low Throughput Network (LTN); Use Cases and System Characteristics. ETSI TS 103 249 V1.1.1. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2017.
7. ETSI. DECT-2020 New Radio (NR); Part 1: Overview. ETSI TS 103 636-1. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2020.
8. Okano M.T. IoT and industry 4.0: The industrial new revolution // *Proceedings of the International Conference on Management and Information Systems*, Istanbul, Turkey, 3-6 сентября 2017. Vol. 25. P. 75-82.
9. Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Koucheryavy Y., Samouylov K. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 9241-9256. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144309>
10. Schulz P., Matthe M., Klessig H., Simsek M., Fettweis G., Ansari J., Ashraf S.A., Almeroth B., Voigt J., Riedel I., et al. Latency critical IoT applications in 5G: Perspective on the design of radio interface and network architecture // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55. No. 2. P. 70-78. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600435CM>
11. Winkelhaus S., Grosse E.H. Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system // *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58. No. 1. P. 18-43. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1612964>
12. Yadav G., Paul K. Architecture and security of SCADA systems: A review // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2021. Vol. 34. P. 100433. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100433>
13. Семенова О.В., Власкина А.С., Медведева Е.Г., Зарипова Э.Р., Гудкова И.А. Процедура установления соединения по радиоканалу случайного доступа с возможностью ретрансляции // *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*. 2018. Т. 26. № 3. С. 261-271. <https://doi.org/10.22363/2312-9735-2018-26-3-261-271>
14. Medvedeva E., Zaripova E., Semenova O., Vlaskina A., Gudkova I., Gaidamaka Y. Discrete time Markov chain model for analyzing characteristics of RACH procedure under massive machine type communications // *ACM International Conference Proceeding Series*. 2018. Article No. 59. <https://doi.org/10.1145/3231053.3231112>
15. Kaul S., Gruteser M., Rai V., Kenney J. Minimizing age of information in vehicular networks // *Proceedings of the 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, Salt Lake City, UT, USA, 27-30 июня 2011. P. 350-358. <https://doi.org/10.1109/SAHNCN.2011.5984966>
16. Zhibankova E., Khakimov A., Markova E., Gaidamaka Y. The Age of Information in Wireless Cellular Systems: Gaps, Open Problems, and Research Challenges // *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 19. P. 8238. <https://doi.org/10.3390/s23198238>
17. Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Огур М.Г., Линец Г.И., Мочалов В.П. Имитационная модель масштабируемого метода выявления многовекторных атак с учетом ограничений вычислительных и информационных ресурсов IoT-устройств // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13. № 5. С. 25-40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-25-40> (дата обращения: 16.03.2024).
18. Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Гинцяк А.М., Бурулцкая Ж.В., Редько С.Г. Современные методы оптимизации и особенности их применения // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13. № 4. С. 78-94. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94> (дата обращения: 16.03.2024).
19. Stamatakis G., Pappas N., Traganitis A. Control of status updates for energy harvesting devices that monitor processes with alarms // *Proceedings of the 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Big Island, HI, USA, 9-13 декабря 2019. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2019.8960832>
20. Stamatakis G., Pappas N., Fragkiadakis A.,

- Traganitis A. Autonomous maintenance in IoT networks via aoi-driven deep reinforcement learning // Proceedings of the IEEE INFOCOM 2021 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Vancouver, BC, Canada, 10–13 мая 2021. P. 1-7. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484463>
21. Groshev M., Guimaraes C., De La Oliva A., Gazda R. Dissecting the impact of information and communication technologies on digital twins as a service // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 102862-102876. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097548>
  22. Inoue Y., Masuyama H., Takine T., Tanaka T. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues // IEEE Transactions on Information Theory. 2019. Vol. 65. No. 12. P. 8305-8324. <https://doi.org/10.1109/TIT.2019.2934215>
  23. Kosta A., Pappas N., Angelakis V. Age of information: A new concept, metric, and tool // Foundations and Trends in Networking. 2017. Vol. 12. No. 3. P. 162-259. <https://doi.org/10.1561/13000000060>
  24. Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? // Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM, Orlando, FL, USA, 25-30 марта 2012. P. 2731-2735. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2012.6195639>
  25. Коновалов М. Г., Разумчик Р. В. Об одной эвристической диспетчеризации для двухфазных систем массового обслуживания по запаздывающей информации об их состоянии // Информатика и её применения. 2025. Т. 19. № 4. С. 35-42.
  26. Разумчик Р. В., Зейфман А. И., Коротышева А. В., Сатин Я. А. Оценка энергоэффективности вычислительного кластера с помощью системы массового обслуживания с пороговым контролем и зависящими от времени интенсивностями обслуживания и поступления // Системы и средства информатики. 2015. Т. 25. № 4. С. 19-30. <https://doi.org/10.14357/08696527150402>

**Медведева Екатерина Георгиевна.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Россия. Доцент кафедры компьютерной и информационной безопасности. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Ведущий редактор. Кандидат физико-математических наук. Область научных интересов: теория телетрафика, прикладная теория вероятностей, сети 5G, Интернет вещей, построение имитационных моделей для анализа сетей телекоммуникаций. E-mail: medvedeva\_eg@mirea.ru (Ответственный за переписку)

**Заринова Эльвира Ринатовна.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Россия. Доцент кафедры компьютерной и информационной безопасности. Московский ордена Почета университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя, г. Москва, Россия. Доцент кафедры естественнонаучных дисциплин. Кандидат физико-математических наук. Область научных интересов: прикладное применение технологий искусственного интеллекта, информационная безопасность, теория графов. E-mail: zaripova\_e@mirea.ru

**Маркова Екатерина Викторовна.** Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия. Доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Область научных интересов: математическое моделирование и анализ производительности сетей 5G/6G, умные города, совместное использование спектра частот, многоадресные услуги, радиодоступ, теория телетрафика, теория массового обслуживания. E-mail: markova-ev@rudn.ru

## Age of Information as a QoS Metric in Industrial Internet of Things Monitoring applications\*

E.G. Medvedeva<sup>I,II</sup>, E.R. Zaripova<sup>I,III</sup>, E.V. Markova<sup>II,IV</sup><sup>I</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University»<sup>II</sup> Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences<sup>III</sup> Federal state public educational establishment of higher education “Moscow Order Of Honor University of the Ministry of the Interior of the Russian Federation named after V.Y. Kikot”<sup>IV</sup> People’s Friendship University of Russia Named After Patrice Lumumba

**Abstract:** A critically important function for massive Machine-Type Communications (mMTC) and Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC) applications in 5G networks is the timely delivery of status updates from remote objects to the control center. To assess the efficiency of such systems, the “Age of Information” (AoI) metric is used, reflecting the data freshness at the receiving end. This paper presents a conceptual model of an Industrial Internet of Things monitoring system, including transmission channels and data processing nodes from end devices to the control center. The process of update generation, transmission, and processing is formalized, and notations for the components of the total delivery delay are introduced. Based on the proposed model, strict definitions of the random processes of Age of Information (AoI) and Peak Age of Information (PAoI) as functions of time are provided. The relationship of these metrics with queueing theory is shown, which creates a foundation for their further analytical and simulation studies.

**Keywords:** *queueing theory, quality of service, age of information, 5G networks.*

**DOI:** 10.14357/20790279260210 **EDN:** ZRFEMQ

## References

1. ITU-R. 2017. Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface. ITU-R Recommendation M.2410-0. Geneva, Switzerland: ITU-R.
2. Zhang J., Kang K., Yang M., Zhu H., Qian H. AoI-minimization in UAV-assisted IoT Network with Massive Devices. *Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Austin, TX. 2022. p.1290-1295. <https://doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771887>
3. Andersen F.R., Ballal K.D., Petersen M.N., Ruepp S. Ranging Capabilities of LoRa 2.4 GHz. *Proceedings of the 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Virtual, 2020. P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT48130.2020.9221451>
4. Simka M., Polak L. On the RSSI-based indoor localization employing LoRa in the 2.4 GHz ISM band. *Radioengineering*. 2022;31(1):135-143. <https://doi.org/10.13164/re.2022.0135>
5. ETSI. Short Range Devices; Low Throughput Networks (LTN) Architecture; LTN Architecture. ETSI TS 103 358 V1.1.1. Sophia Antipolis: ETSI; 2018.
6. ETSI. Low Throughput Network (LTN); Use Cases and System Characteristics. ETSI TS 103 249 V1.1.1. Sophia Antipolis: ETSI; 2017.
7. ETSI. DECT-2020 New Radio (NR); Part 1: Overview. ETSI TS 103 636-1. Sophia Antipolis: ETSI; 2020.
8. Okano M.T. IoT and industry 4.0: The industrial new revolution. *Proceedings of the International Conference on Management and Information Systems*, Istanbul, Turkey, 2017. 25:75-82.
9. Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Koucheryavy Y., Samouylov K. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments. *IEEE Access*. 2022; 10:92419256. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144309>
10. Schulz P., Matthe M., Klessig H., Simsek M., Fettweis G., Ansari J., et al. Latency critical IoT applications in 5G: Perspective on the design of radio interface and network architecture. *IEEE Communications Magazine*. 2017;55(2):70-78. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600435CM>
11. Winkelhaus S., Grosse E.H. Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*. 2020;58(1):18-43. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1612964>
12. Yadav G., Paul K. Architecture and security of SCADA systems: A review. *International*

\* The research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-19-00804), <https://rscf.ru/en/project/24-19-00804/> (recipient E.V. Markova, Section 1).

- Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2021;34:100433. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100433>
13. Semenova O.V., Vlaskina A.S., Medvedeva E.G., Zaripova E.R., Gudkova I.A. RACH Session Initiation Procedure with Retranslations. *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*. 2018;26(3):261-271. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-9735-2018-26-3-261-271>
  14. Medvedeva E., Zaripova E., Semenova O., Vlaskina A., Gudkova I., Gaidamaka Y. Discrete time Markov chain model for analyzing characteristics of RACH procedure under massive machine type communications. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2018. Article No. 59. <https://doi.org/10.1145/3231053.3231112>
  15. Kaul S., Gruteser M., Rai V., Kenney J. Minimizing age of information in vehicular networks. *Proceedings of the 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, Salt Lake City, UT, 2011. P. 350-358. <https://doi.org/10.1109/SAHCN.2011.5984966>
  16. Zhbankova E., Khakimov A., Markova E., Gaidamaka Y. The Age of Information in Wireless Cellular Systems: Gaps, Open Problems, and Research Challenges. *Sensors*. 2023;23(19):8238. <https://doi.org/10.3390/s23198238>
  17. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ogur M.G., Linets G.I., Mochalov V.P. Simulation model of a scalable method for detecting multi-vector attacks taking into account the limitations of computing and information resources of IoT devices. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):25-40. (In Russ.) EDN: JKQMOM. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-25-40>
  18. Beketov S.M., Zubkova D.A., Gintsyuk A.M., Burlutskaya Zh.V., Redko S.G. Modern optimization methods and their application features. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):78-94. (In Russ.) EDN: CVZOXD. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94>
  19. Stamatakis G., Pappas N., Traganitis A. Control of status updates for energy harvesting devices that monitor processes with alarms. *Proceedings of the 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Big Island, HI, 2019. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2019.8960832>
  20. Stamatakis G., Pappas N., Fragkiadakis A., Traganitis A. Autonomous maintenance in IoT networks via aoi-driven deep reinforcement learning. *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2021 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Vancouver, BC, Canada, 2021. P. 1-7. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484463>
  21. Groshev M., Guimaraes C., De La Oliva A., Gazda R. Dissecting the impact of information and communication technologies on digital twins as a service. *IEEE Access*. 2021;9:102862-102876. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097548>
  22. Inoue Y., Masuyama H., Takine T., Tanaka T. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2019;65(12):8305-8324. <https://doi.org/10.1109/TIT.2019.2934215>
  23. Kosta A., Pappas N., Angelakis V. Age of information: A new concept, metric, and tool. *Foundations and Trends in Networking*. 2017;12(3):162-259. <https://doi.org/10.1561/13000000060>
  24. Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? *Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, 2012. P. 2731-2735. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2012.6195639>
  25. Konovalov M.G., Razumchik R.V. Heuristic online load balancing in two-phase tandem queues with delays. *Informatika i ee Primeneniya*. 2025;19(4):35-42. (In Russ.)
  26. Razumchik R.V., Zeyfman A.I., Korotysheva A.V., Satin Ya.A. Energy efficiency estimation of the computational cluster using a queueing system with threshold control and time-dependent service and arrival rates. *Sistemy i Sredstva Informatiki*. 2015;25(4):19–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.14357/08696527150402>

**Medvedeva Ekaterina Georgievna.** MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia. Associate Professor of the Department of Computer and Information Security; Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Leading Editor. Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics. Research interest: teletraffic theory, applied probability theory, network analysis, 5G networks, Internet of Thing, simulation models. E-mail: medvedeva\_eg@mirea.ru (Responsible for correspondence).

**Zaripova Elvira Rinatovna.** MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia. Associate Professor of the Department of Computer and Information Security; Federal state public educational establishment of higher education “Moscow Order Of Honor University of the Ministry of the Interior of the Russian Federation named after V.Y. Kikot”, Moscow, Russia. Associate Professor. Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics. Research interest: applied application of artificial intelligence technologies, information security, graph theory. E-mail: zaripova\_e@mirea.ru

**Markova Ekaterina Viktorovna.** People’s Friendship University of Russia Named After Patrice Lumumba, Moscow, Russia. Associate Professor of the Department of Probability Theory and Cyber Security; Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Researcher. Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics. Research interest: Mathematical modeling and performance analysis of 5G/6G networks, smart cities, spectrum sharing, multicast services, radio access, teletraffic theory, queuing theory. E-mail: markova-ev@rudn.ru