

УДК 004.415'2:004.77

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.050465

О. В. ЖИДКА, аспірант;

ORCID: 0009-0009-4272-9071

Д. А. БОНДАРЕНКО, аспірант,

ORCID: 0009-0005-0197-4493

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЙМОВІРНІСНО-ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ

У статті представлено імітаційну модель для аналізу ймовірнісних та часових параметрів інформаційної взаємодії у мережі Інтернету речей (IoT). Модель реалізує різні режими обміну даними між сенсорними пристроями та сервером, такі як опитування, переривання та множинний доступ. Основна увага приділяється оцінці ймовірнісно-часових характеристик з урахуванням стохастичного характеру процесу доступу до сервера та ймовірності виникнення колізій. Отримані результати можуть бути корисними для оптимізації роботи IoT-мереж у різних галузях, включаючи промисловість, “розумні міста” та транспорт.

Ключові слова: Інтернет речей, ймовірнісна модель, сенсорний пристрій, інформаційна взаємодія, колізія.

Вступ

Постановка проблеми. Інтернет речей представляє собою технологічну інновацію, що змінює природу сучасної інфраструктури, виробництва та повсякденного життя. Із зростанням кількості IoT-пристроїв постає питання про оптимізацію інформаційного обміну та управління ресурсами. Одним із ключових аспектів ефективного функціонування IoT є точне прогнозування ймовірнісно-часових характеристик обміну даними, таких як затримки при передаванні, ймовірність втрати пакетів, відмови системи та інші параметри, що впливають на надійність і стабільність мережі.

Розробка моделей для оцінки цих характеристик має велике значення для забезпечення надійної роботи IoT-систем. Від точності оцінки цих параметрів залежить безпека і ефективність процесів у реальному часі. При побудові IoT-мережі важливо враховувати можливість одночасного передавання даних від кількох пристроїв управління, що може призвести до колізій джерел даних. Програмне забезпечення сервера повинно вміти виявляти та усувати такі ситуації. У даній статті запропоновано модель, яка дозволяє оцінити час передавання даних з урахуванням колізій, враховуючи різні режими доступу пристроїв до сервера.

Аналіз останніх досліджень. Тема оцінки ймовірнісно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережах IoT активно досліджується різними науковцями у контексті розподілених систем, мережних протоколів і стохастичних моделей.

Автори [1] розглядають технології та стандарти IoT, акцентуючи увагу на стохастичних моделях і архітектурах для оцінки продуктивності IoT. У їхніх роботах використовується підхід до багат шарової архітектури, що дозволяє детально моделювати кожен шар інформаційної взаємодії (MDPI).

Вченими активно досліджуються агентні та складні адаптивні моделі для оцінки енергоспоживання і характеристик передавання даних у великих мережах IoT. Вони використовують стохастичні підходи для моделювання комунікаційних затримок і розподілу навантаження в мережах сенсорів (SpringerOpen) [2].

З огляду на новизну тематики, ключові характеристики та складність організації IoT, моделювання та відповідні алгоритми виступають основним інструментом дослідження на ранніх етапах розробки Інтернету речей [3].

Мета роботи. Розробити імітаційну модель, що реалізує різні режими інформаційної взаємодії сенсорних пристроїв і сервера: опитування, переривань і множинного доступу. Оцінити ймовірно-часові характеристики інформаційної взаємодії з врахуванням стохастичного характеру процесу доступу сенсорних пристроїв до сервера і ймовірності виникнення колізій.

Основна частина

Режим опитування. Існує декілька режимів організації доступу до загальних ресурсів, таких як канал зв'язку та обчислювальні потужності сервера: опитування, переривання та множинний доступ [4]. Розглянемо ці режими детальніше для забезпечення коректного моделювання та порівняння результатів залежно від навантаження та інших параметрів IoT.

У режимі опитування сенсорні пристрої починають передавання даних лише після запиту з боку сервера. Якщо у сенсорного пристрою немає готового для передавання пакету даних, спеціальний логічний механізм формує пакет стану та повідомляє сервер про свою працездатність. Час, необхідний для виконання опитування, залежить від фізичних властивостей каналу зв'язку, які визначають затримку розповсюдження сигналу [5].

Час обслуговування t_s сенсорного пристрою у режимі опитування формується так:

$$t_s = t_p + \frac{\bar{b}}{C},$$

де t_p – час, що витрачається на сигнал опитування, \bar{b} – середнє значення довжини пакету, біт; C – пропускна спроможність каналу, біт/с.

Відповідно, повний цикл взаємодії N сенсорних пристроїв і сервера дорівнює $T_c = Nt_s$. Тимчасова діаграма реалізації режиму опитування у мережі IoT зображена на рис.1. Вона демонструє, як сервер посилає запити до кожного сенсора по черзі, і кожен сенсор відповідає у своєму часовому слоті, передаючи дані або статус.

Час t_p включає як час формування запиту, так і затримку розповсюдження. Співвідношення b/C – це час, необхідний для передавання b біт зі швидкістю C біт на секунду. Якщо сенсорний пристрій (СП), який опитують, не має готового повідомлення для передавання, то значення b є дуже малим, оскільки передається стандартне керуюче повідомлення про відсутність даних для передавання. У випадку, якщо у буфері накопичено пакет даних, значення b дорівнює кількості біт у пакеті. Співвідношення (1) дозволяє оцінити середній час обслуговування одного СП за умови, що дисперсія b значно менша, ніж \bar{b} .

Якщо кожен СП передає в середньому λ пакетів на секунду, то для системи, що містить N сенсорних пристроїв, загальна інтенсивність потоку даних складе λN пакетів на секунду, а середній інтервал між їх надходженнями дорівнює $1/\lambda N$ секунд. Отже, для уникнення безмежного зростання черги, час обслуговування t_s повинен відповідати умові:

$$\bar{t}_s = t_p + \frac{\bar{b}}{C} \leq \frac{1}{\lambda N}.$$

Розв'язуючи рівняння (2) відносно C , отримаємо умову, яка гарантує відсутність черг для кожного сенсорного пристрою:

$$C \geq \frac{\lambda N \bar{b}}{1 - \lambda N t_p}.$$

Згідно з цією умовою, кожен сенсорний пристрій опитується кожні $1/\lambda$ секунд і в той же час у ньому формується черговий пакет даних.

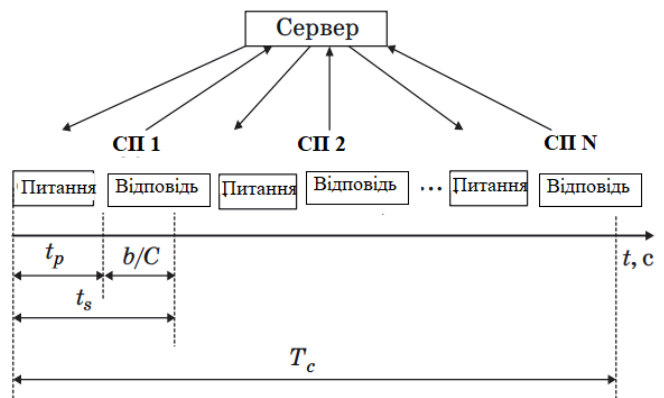


Рис. 1. Тимчасова діаграма реалізації режиму опитування

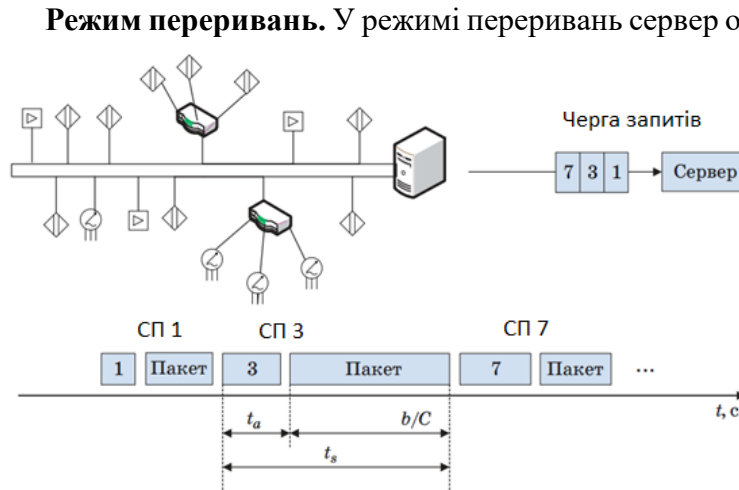


Рис. 2. Схема та тимчасова діаграма реалізації режиму переривань

Для випадкових запитів на передавання даних ймовірність перетину двох або більше запитів дорівнює:

$$P_c = 1 - e^{-N\lambda T},$$

де T — час передавання пакету довжиною b бітів.

При повторних запитах фактична інтенсивність надходження перевищить λ . Відповідно до закону Пуассона можна визначити ймовірність виникнення конфлікту:

$$P_c = 1 - e^{-\Lambda T},$$

де Λ — реальна інтенсивність надходження пакетів у T -секундному інтервалі, $\Lambda = N\lambda + P_c\lambda$.

Тоді, продуктивність такої системи дорівнює $N\lambda T = \Lambda T e^{-\Lambda T}$. Щоб знайти максимальну продуктивність, продиференціюємо $N\lambda T$ по ΛT і результат прирівняємо до нуля:

$$\frac{d(N\lambda T)}{d\Lambda T} = e^{-\Lambda T} - \Lambda T e^{-\Lambda T} = 0;$$

$$1 - \Lambda T = 0, \Lambda T = 1.$$

Підставляючи це значення ΛT у вираз для $N\lambda T$, визначимо максимальну кількість сенсорних пристроїв N_{max} , при якій за заданої пропускної здатності можна уникнути критичного рівня колізій: $(N\lambda T)_{max} = 1/e$. Враховуючи, що $T = b/C$:

$$N_{max} = \frac{C}{e\lambda b}.$$

Ці рівняння отримані на основі припущення про наявність окремого каналу для надсилення запитів.

Час перебування запитів у черзі t_a можна визначити за допомогою співвідношення інтенсивностей їх надходження та обслуговування. Загальний час обслуговування t_s включає в себе час доступу t_a і час передавання даних $\frac{\bar{b}}{C}$. Таким чином:

$$t_s = t_a + \frac{\bar{b}}{C}.$$

Це рівняння аналогічне до рівняння (1) для режиму опитування. Як міру ефективності такого режиму взаємодії можна взяти коефіцієнт завантаження ρ .

Якщо $\rho > 1$, то запити надходять швидше, ніж їх встигають обробляти, що призводить до без-межного зростання черг. При $\rho \leq 1$ черга залишається обмеженою. Фізичний зміст ρ полягає у відношенні середнього часу обслуговування до середнього інтервалу між надходженням запитів [7].

Режим множинного доступу. Доступ до сервера розподіляється між сенсорними пристроями через ймовірнісний арбітраж. Якщо пристрій має дані, він починає передавати пакет на сервер. Якщо відбувається конфлікт із даними інших пристроїв, передавання переривається і планується повторно. У разі відсутності конфліктів пакет передається успішно. Для уникнення повторних конфліктів пристрої передають дані у випадкові інтервали часу t_r . Інтервали передавання коригуються на основі історії конфліктів. Множинний доступ може бути реалізований у тактовому або нетактовому режимі залежно від інтервалів передавання. На рис. 3 зображено тимчасову діаграму реалізації режиму множинного доступу.

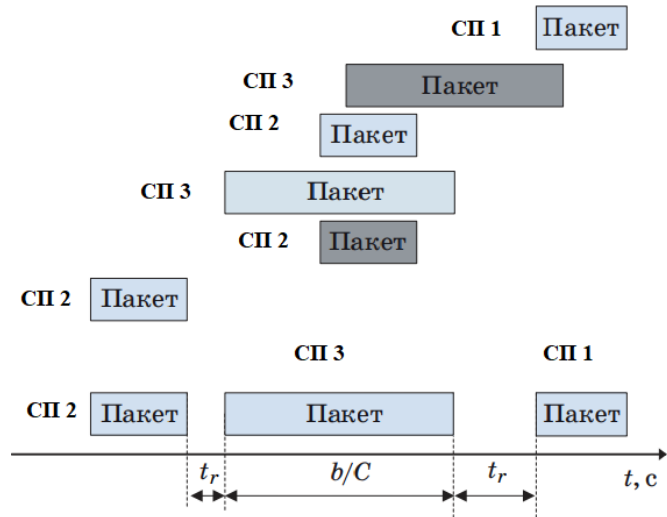


Рис. 3 Часова діаграма реалізації режиму множинного доступу

Такт дорівнює максимальному інтервалу часу між моментом початку передавання СП і моментом виявлення конфлікту:

$$P = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{(N-1)},$$

де P – ймовірність того, що рівно один СП спробує передати пакет протягом такту і отримає доступ до сервера, а N – кількість сенсорних пристроїв у черзі на передавання.

Ефективність режиму множинного доступу або частка часу, протягом якого пакети передаються без повторних спроб, визначається наступним чином:

$$\rho = \frac{b/C}{b/C + WT_T},$$

де W – середня кількість тактів, що пройшли під час конкуренції, поки сенсорний пристрій не отримає доступ для передавання даних, $W = (1 - P)/P$; T_T – тривалість такту.

Нехай задано: N – кількість сенсорних пристроїв, що взаємодіють із сервером; ΔT – період дискретизації. За допомогою методів імітаційного моделювання оцінимо час передавання даних від сенсорних пристроїв на сервер при різних режимах доступу в умовах виникнення колізій.

Особливості реалізації імітаційного моделювання передавання даних від сенсорів при різних режимах доступу. Кожному сенсорному пристрою в мережі IoT присвоюється унікальний ідентифікатор ID , який базується на його IP-адресі. Після цього для кожного СП за допомогою генератора випадкових чисел (позначимо їх RND) обирається випадкове значення часу t початку передавання даних. Це значення вибирається з певного діапазону $[L, R]$, де L і R – мінімальні та максимальні межі часу, між якими пристрій може почати передавання.

$$t = r\Delta T, \tag{1}$$

де r – випадкове число, $r \in RND$.

Такий випадковий розподіл часу передавання мінімізує ймовірність колізій між пристроями, які одночасно намагаються передати дані на сервер. Це дозволяє рівномірніше розподілити навантаження на мережу і підвищити її ефективність. Таке планування може адаптуватися до змін навантаження або умов роботи сенсорних пристроїв, що підвищує загальну продуктивність IoT-мережі.

Сервер встановлює з'єднання з тим СП, для якого $\min[t_i = \overline{1, n.}]$, нехай ID цього сенсора дорівнює k . Для решти СП новий час початку передавання визначається за формулою:

$$J_i \Delta T = J_{i-1} \Delta T + r_{pak} \Delta T + r \Delta T,$$

де J_i – точка відліку початку наступного передавання даних – це момент, коли сенсорний при-стрій починає чергове передавання; J_{i-1} – це точка початку передавання даних попереднього, тобто $(k - 1)$ -го сенсорного пристрою; r_{pak} – кількість точок відліку часу, необхідних для передавання даних (це стала величина, яка залежить від довжини пакету даних); r – число, що визначає кількість точок відліку, необхідних для встановлення наступного передавання.

Ці параметри визначають, скільки часу витрачається на різні етапи взаємодії між сервером і сенсорними пристроями в залежності від обраного режиму доступу:

- час t_p , необхідний для запиту k -го СП під час реалізації режиму опитування;
- час доступу t_a при реалізації режиму переривань;
- випадкова затримка щодо завершення передавання даних $(k - 1)$ -м СП під час реалізації режиму множинного доступу.

Вираз (12) є основою для реалізації імітаційної моделі. Пояснимо деякі особливості запропонованої моделі.

Розподіл початку передавання даних від сенсорних пристроїв у часі для кожної ітерації представлений як двовимірна матриця $\|p_{ij}\|_{N \times M}$, де M – це відліки часу. Для кожного СП визначається випадкова затримка $t_i, i = \overline{1, N}$, що позначає час початку звернення до сервера відносно завершення передавання даних попереднім сенсором, у вигляді випадкового числа $r \in RND[L, R]$.

Тобто, для кожного пристрою моделюється випадкова затримка перед початком передавання, що дозволяє оптимізувати роботу системи, зменшуючи ймовірність колізій між СП. Наприклад, «1» у першому рядку матриці $\|p_{ij}\|$ означає, що для СП з $ID = 0$ затримка початку передавання $t = 3$. Наявність «1» у другому рядку матриці $\|p_{ij}\|$ означає, що для СП з $ID = 1$ затримка початку передавання $t = 1$ і так далі:

$$\left\| \begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\|$$

Далі виконується пошук сенсорного пристрою з ID , який має мінімальну затримку початку передавання. У наведеному прикладі - це сенсор з $ID = 1$. У разі виявлення колізії визначаються нові точки відліку початку передавання відповідно до формули (12). Якщо колізії немає, управління передається серверу для зчитування даних із подальшою їх обробкою та зберіганням. Дозвіл на зчитування даних визначається за такими умовами:

- якщо $(J_{i_k} - J_{i-1_k}) > r, k = \overline{1, N}$, то СП з $ID = k$ передає дані;
- якщо $(J_{i_k} - J_{i-1_k}) \leq r, k = \overline{1, N}$, це означає, що СП з $ID = k$ потрапив у колізію і йому призначається нове значення j_i для наступної спроби передавання.

Аналіз результатів моделювання. Результати проведених експериментів свідчать про те, що середній час передавання даних зменшується із збільшенням параметра r_{pak} . Це явище можна пояснити підвищенням точності обчислення часу початку передавання, оскільки з ростом r_{pak} період дискретизації ΔT зменшується. У результаті зменшується «вага» кожної точки відліку у загальному часі моделювання, що призводить до більш точних розрахунків моментів, коли сенсорні пристрої можуть почати передавання своїх даних.

Збільшення r_{pak} дозволяє отримати більше точок вимірювання, що в свою чергу покращує оцінку часу початку передавання. Це важливо для систем, які працюють в умовах конкуренції між сенсорними пристроями за доступ до сервера, оскільки зниження ймовірності колізій сприяє підвищенню ефективності передавання даних.

Проте, слід зазначити, що із збільшенням r_{pak} час моделювання істотно зростає. Це пов'язано з тим, що в системі стає більше параметрів для обробки, що вимагає додаткових обчислю-

вальних ресурсів і часу. Таким чином, існує певний компроміс між точністю розрахунків і швидкістю виконання моделювання.

Отже, під час проектування та оптимізації систем Інтернету речей важливо враховувати цей баланс між точністю передавання даних і тривалістю моделювання, щоб досягти найкращих результатів у функціонуванні мережі в цілому. Розуміння цього взаємозв'язку може допомогти інженерам і розробникам знайти оптимальні рішення для забезпечення ефективної роботи систем IoT [8].

Із збільшенням кількості сенсорних пристроїв, що взаємодіють із сервером, середній час передавання даних також зростає. Це свідчить про те, що модель може бути використана для визначення максимально можливої кількості СП, яка може бути підключена до сервера, виходячи з вимог до часу передавання.

На рис. 4 зображена залежність максимального числа СП від навантаження ρ максимального режиму взаємодії в залежності від прогнозованого навантаження в кластері. Це дозволить максимально ефективно використовувати ресурси мережі та зменшити ймовірність виникнення колізій, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню загальної продуктивності системи.

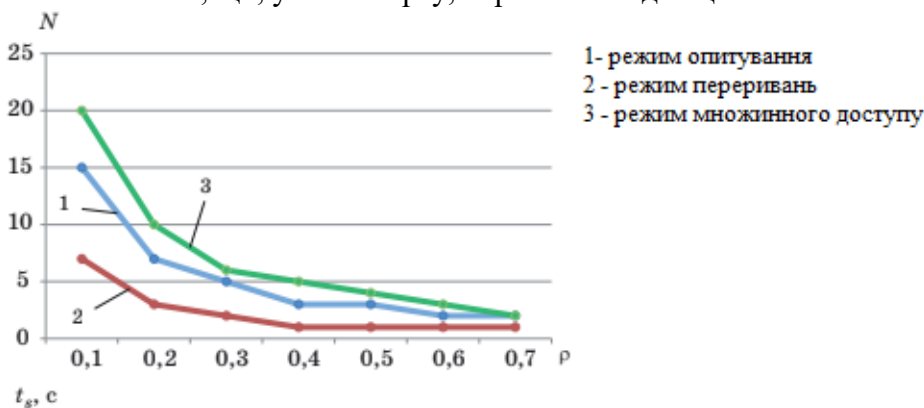


Рис. 4. Залежність N від ρ

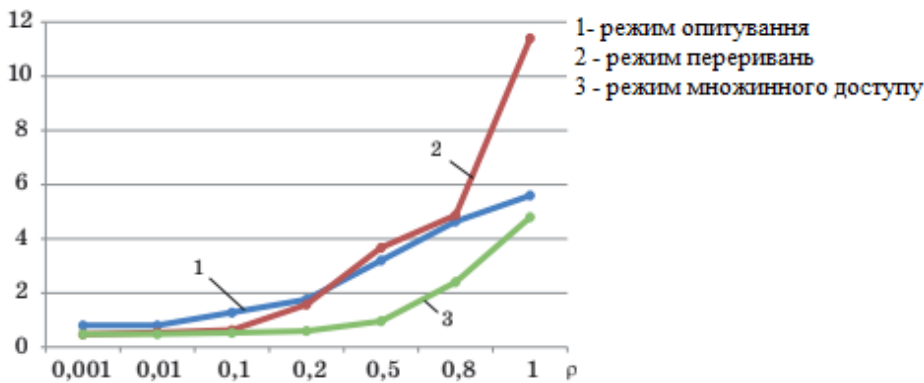


Рис. 5. Залежність \bar{t}_s від ρ

трої залишатися активними. Однак, такі умови малореалістичні, оскільки сенсори повинні чергувати сплячий режим з активністю для економії енергії і продовження їхнього терміну служби.

З іншого боку, при малих навантаженнях $\rho < 0,1$, що більше відповідає реальним умовам, різниця у характеристиках часу між режимами є незначною. Проте в таких умовах режим опитування може бути кращим вибором, оскільки всі дії виконує сервер, а сенсорні пристрої можуть залишатися у сплячому режимі, якщо немає даних для передавання, що допомагає зберегти енергію.

Також цікаво порівняти режими опитування та переривань: при $\rho < 0,2$ час передавання даних є меншим при організації взаємодії сенсорних пристроїв з сервером у режимі переривань. Проте з підвищенням ρ взаємодія в режимі опитування стає більш вигідною [9].

На рис. 5 наведені результати залежності середнього часу передавання даних \bar{t}_s від навантаження ρ при $N = 10$ для різних режимів взаємодії СП та сервера (інтенсивність λ при цьому змінювалася від 0,1 до 100 пакетів/с).

Аналіз показує переваги режиму множинного доступу при навантаженнях понад $\rho > 0,1$. При високому навантаженні СП постійно активні через підвищену ймовірність колізій, що вимагає їх вирішення. Часті спроби отримати доступ до сервера змушують пристрої залишатися активними.

Висновки

Проектування систем Інтернету речей пов'язане з низкою завдань, які вимагають моделювання процесів інформаційної взаємодії. Це дозволяє при прогнозованому трафіку розробляти оптимальні режими функціонування таких систем.

Запропонована модель імітує різні режими доступу сенсорних пристроїв до сервера для передавання даних і дає змогу оцінити ймовірно-часові характеристики інформаційної взаємодії з урахуванням стохастичного характеру процесу доступу, і ймовірності виникнення колізій. Модель є інваріантною щодо кількості сенсорних пристроїв, формату пакету даних та середнього часу передавання даних в умовах колізій.

Ця модель може бути застосована на ранніх етапах проектування систем Інтернету речей для покращення ефективності їх роботи.

Список літератури

1. Ali O., Ishak M.H., Bhatti M.K.L., Khan I., Kim K.-I. A comprehensive review of Internet of Things: Technology stack, middlewares, and Fog/Edge computing interface // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – Article 995. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22030995>.
2. Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). *Internet of Things: Vision, applications and research challenges*. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497-1516. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
3. Nižetić S., Šolić P., López-de-Ipiña González-de-Artaza D., Patrono L. *Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future* // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Т. 274. – С. 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
4. Довгий С.О., Згуровський М.З., Лагутін А.А. "Інформаційно-комунікаційні системи: основи побудови та перспективи розвитку". — Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2016. 450 с.
5. Kurose, J.F., Ross, K.W. "Computer Networking: A Top-Down Approach". — Pearson, 2017. 864 pages.
6. Shafique K., Khawaja B.A., Sabir F., Qazi S., Mustaqim M. *Internet of Things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for 5G-IoT scenarios* // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 23022–23040.
7. Laroui M., Nour B., Mounghla H., Cherif M.A., Afifi H., Guizani M. *Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions* // *Future Generation Computer Systems*. – 2020. – Vol. 109. – P. 924–931. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.003>
8. Ali O., Ishak M.K., Bhatti M.K.L. *New IoT domains, current standings and open research: A review* // *PeerJ Computer Science*. – 2021. – Vol. 7. – Article e659. – DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.659>.
9. Lin J., Yu W., Zhang N., Yang X., Zhang H., Zhao W. *A survey on Internet of Things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications* // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2017. – Vol. 4. – P. 1125–1142.

O. Zhydka, D. Bondarenko

MODEL FOR ESTIMATING PROBABILISTIC-TEMPORAL PARAMETERS OF INFORMATION INTERACTION IN THE INTERNET OF THINGS

This paper presents a simulation model for analyzing the probabilistic and temporal parameters of information interaction in the Internet of Things (IoT) network. The IoT consists of a large number of devices, sensors, and machines that exchange data in real-time. The model implements various modes of data exchange between sensor devices and the server, including polling, interruptions, and multiple access. One of the critical challenges in such networks is ensuring efficient data transmission while minimizing delays, collisions, and the probability of packet loss. In this context, the proposed model focuses on the evaluation of probabilistic and temporal characteristics of data exchange, taking into account the stochastic nature of sensor devices' access to the server and the likelihood of

collisions when multiple devices attempt to transmit data simultaneously.

The model also considers various access modes to the server, which is essential for understanding and mitigating potential sources of data collisions and communication delays in IoT networks. The stochastic nature of sensor devices and their asynchronous data transmission often result in collisions that degrade the network's performance. The model allows for the evaluation of these issues by simulating different scenarios and calculating the potential delays and packet loss probabilities under varying conditions of data access and transmission.

By incorporating real-time access and transmission scenarios, the model aims to provide a comprehensive tool for evaluating the reliability and stability of IoT networks. These evaluations are critical for the effective functioning of IoT systems, particularly in sectors where real-time data processing is crucial, such as industrial automation, smart cities, healthcare, and transportation systems.

The results obtained from this model can contribute to optimizing the performance of IoT networks by offering insights into the best practices for minimizing delays and collisions in various practical applications. For example, in industrial systems, where precision and timely data transmission are critical, or in healthcare systems that rely on real-time patient monitoring, optimizing these parameters can significantly improve efficiency and safety.

Keywords: Internet of things, probabilistic model, sensor device, information interaction, collision.
