

Жидка Ольга Валеріївна

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

ORCID: 0009-0009-4272-9071

ЙМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ З ТОПОЛОГІЄЮ MESH

Анотація: У статті запропоновано ймовірнісну модель встановлення інформаційної взаємодії в мережі Інтернету речей (IoT) із топологією mesh, побудовану з використанням мультиагентного підходу. Модель враховує фундаментальні характеристики IoT та дозволяє оцінювати як абсолютні, так і ймовірнісні параметри взаємодії. До моделі включено умови, що відповідають реальним процесам інформаційної взаємодії: наявність несправних каналів та точок доступу, обмеження на кількість повторних спроб встановлення з'єднань, а також наявність альтернативних маршрутів.

Для оцінювання часу передачі даних запропоновано використати метод перетворення Лапласа-Стілт'єса (ПЛС). Його перший центральний момент дає змогу визначити середній час передачі даних у межах встановленого з'єднання, а ймовірнісний сенс ПЛС дозволяє оцінити ймовірність доставки даних. Метод забезпечує аналіз розподілу часу перебування даних в мережі IoT за заданими ймовірностями виникнення помилок на елементах маршруту між усіма парами сенсорних пристроїв. Використовуючи ПЛС, можна оцінити допустиме навантаження маршруту за обмеженням часу та, відповідно, обрати оптимальний алгоритм самоорганізації мережі.

Ключові слова: Інтернет речей, IoT, ймовірнісна модель, сенсорний пристрій, сенсорні мережі, інформаційна взаємодія.

Olga Zhydka

State University of Information and Communication Technologies, Kyiv

ORCID: 0009-0009-4272-9071

A PROBABLE MODEL OF ESTABLISHING INFORMATION INTERACTION IN THE INTERNET OF THINGS NETWORK WITH MESH TOPOLOGY

Annotation: The article proposes an approach to evaluating the probabilistic and temporal characteristics of information interaction in Internet of Things networks.

Designing Internet of Things systems involves solving tasks related to modeling information interaction processes. This enables the determination of optimal operating modes for such systems based on predicted traffic. The core concept of the Internet of Things lies in organizing the interaction between various objects in the environment, transmitting the information they generate, and ensuring a stable connection. Considering the novelty, fundamental characteristics, and complexity of Internet of Things systems, modeling and the development of relevant algorithms are key research tools during the design stage, which highlights the relevance of this work.

The paper proposes a probabilistic model for establishing information interaction in an Internet of Things network with a mesh topology, developed using a multi-agent approach. The model accounts for the fundamental characteristics of Internet of Things and allows the evaluation of both absolute and probabilistic parameters of interaction. The model incorporates conditions corresponding to real-world information interaction processes, including faulty channels and access points, a limited number of reconnection attempts, and the presence of alternative routes.

To evaluate data transmission time, the Laplace-Stieltjes transform method is proposed. Its first central moment enables determining the average data transmission time within an established connection, while the probabilistic interpretation of the Laplace-Stieltjes transform allows assessing the probability of data delivery. The method provides an analysis of the time distribution for k-class data within an IoT network, based on given probabilities of errors occurring on route elements between all pairs of sensor devices. Using the Laplace-Stieltjes transform, it is possible to evaluate the permissible load on a route under a time constraint and, accordingly, select an optimal network self-organization algorithm.

Keywords: *Internet of Things, IoT, probabilistic model, sensor device, sensor networks, information interaction.*

Постановка проблеми.

Проектування IoT-систем супроводжується вирішенням завдань моделювання процесів інформаційної взаємодії. Це дає змогу на основі прогнозованого трафіку визначати оптимальні режими роботи таких систем. Основною концепцією Інтернету речей є організація взаємодії між різноманітними об'єктами в середовищі, передача інформації, яку вони генерують, та забезпечення стабільного з'єднання. Зважаючи на новизну, фундаментальні характеристики та складність побудови IoT-систем, ключовими засобами дослідження на етапі проектування є моделювання та розробка відповідних алгоритмів, що визначає актуальність роботи.

Аналіз останніх досліджень.

Тема оцінки ймовірно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережах IoT активно досліджується різними науковцями в контексті розподілених систем, мережевих 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 багатопарової архітектури, що дозволяє детально моделювати кожен шар інформаційної взаємодії (MDPI).

Вченими активно досліджуються агентні та складні адаптивні моделі для оцінки енергоспоживання і характеристик передачі 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 дослідження.

Розробити ймовірнісну модель встановлення інформаційної взаємодії в мережах Інтернету речей з топологією mesh, яка враховує реальні умови функціонування, такі як несправність каналів зв'язку, обмеження на кількість спроб встановлення з'єднань та наявність альтернативних маршрутів, а також забезпечує оцінку часових і ймовірнісних характеристик передачі даних для оптимізації функціонування IoT-систем.

Результати дослідження.

У бездротових сенсорних мережах кількість сенсорних пристроїв (СП) може змінюватися від кількох сотень до тисяч, залежно від поставленого завдання. Мережі такого великого масштабу та високої щільності з обмеженою пропускну здатністю мають забезпечувати послуги з певним рівнем якості обслуговування. На відміну від традиційних мереж, бездротові сенсорні мережі організуються випадковим чином, а взаємозв'язки між сенсорними пристроями змінюються в часі.

Сенсорні вузли можуть виходити з ладу через різні фактори, такі як недостатній рівень

електроживлення, критичні умови у зовнішньому середовищі або поломка апаратної частини. Вихід з ладу декількох сенсорних вузлів не повинен істотно впливати на роботу всієї мережі або її окремих частин. Іншими словами, Інтернет речей повинен бути стійким до відмов окремих СП і продовжувати підтримувати необхідний рівень якості обслуговування.

Для обчислювальних мереж якість обслуговування визначається через ймовірнісно-часові характеристики. Відповідно до моделі інформаційної взаємодії (ІВ), оцінка ймовірнісно-часових характеристик у мережі Інтернету речей включає сумарний час взаємодії, який можна представити як:

$$t_{iB} = t_{вз} + t_{пд}, \quad (1)$$

де t_{iB} – загальний час інформаційної взаємодії, $t_{вз}$ – час встановлення зв'язку між пристроями, $t_{пд}$ – час передачі даних.

Ця формула відображає загальний час, необхідний для встановлення зв'язку та подальшої передачі даних в мережі Інтернету речей. Оцінка цих характеристик дозволяє зрозуміти рівень якості обслуговування в таких мережах і виявити можливі вузькі місця у передачі інформації [4].

Для оцінки часу встановлення зв'язку t_{iB} пропонується використовувати ймовірнісну модель встановлення з'єднання в мережі Інтернету речей. Оцінка часу передачі даних $t_{пд}$ проводиться за допомогою апарату систем масового обслуговування.

Процес встановлення ІВ у мережі Інтернету речей може займати певний час через її динамічний характер: топологія мережі може багаторазово змінюватися в процесі експлуатації через введення нових вузлів, вихід з ладу існуючих або критичні зміни у зовнішньому середовищі. Усі ці аспекти необхідно враховувати при розробці моделі встановлення з'єднання для інформаційної взаємодії [5].

Встановлення ІВ означає побудову логічного каналу, що з'єднує сенсорний пристрій з шлюзом отримувача для подальшої передачі даних. Завдяки mesh-топології мережі Інтернету речей, між джерелом і отримувачем може бути кілька таких логічних каналів.

Логічний канал складається з фізичних каналів, що з'єднують сусідні сенсорні пристрої. Побудова логічного каналу відбувається шляхом надсилання керуючого сигналу на встановлення з'єднання. Під час проходження виклику через сенсорні пристрої стан кожного фізичного каналу може бути одним із двох: «1» – канал зайнятий, і передача даних неможлива, або «0» – канал вільний для передачі даних.

Повторні спроби встановлення з'єднання додають стохастичний характер цьому процесу, оскільки виникають вимушені повернення до попередніх сенсорних пристроїв, а кількість фізичних каналів, пройдених викликом при його доставці до адресата, стає випадковою величиною. Врахування цього аспекту дозволяє використовувати імітаційне моделювання для дослідження процесу встановлення логічного каналу для інформаційної взаємодії [6].

Таким чином, час встановлення інформаційної взаємодії t_{iB} можна розглядати як випадкову величину, яка може бути визначена наступним виразом:

$$t_{iB} = \sum_{i=1}^{n_k} t_{k_i} + \sum_{i=1}^{n_n} t_{n_i} + n_c t_c, \quad (2)$$

де n_k – кількість пройдених фізичних каналів, n_n – ймовірність успішного встановлення з'єднання, n_c – число спроб в зафіксованій реалізації процесу встановлення інформаційної взаємодії, в загальному випадку $0 \leq n_c < n_{доп}$, де $n_{доп}$ – допустима кількість спроб встановлення взаємодії, t_{k_i} – час проходження i -го фізичного каналу; t_{n_i} – час зворотного проходження i -го фізичного каналу; t_c – час перемикання на інший логічний канал.

Кожен експеримент на імітаційній моделі генерує три випадкові величини: n_k , n_n і n_c ,

що дозволяє оцінити час встановлення інформаційної взаємодії t_{iv} відповідно до виразу (2).

Оцінивши ці величини в кожному експерименті, можна визначити загальний час встановлення ІВ в мережі Інтернету речей як випадкову величину, що враховує всі можливі фактори, які впливають на процес передачі даних.

Отримане значення часу встановлення інформаційної взаємодії t_{iv} визначає результат встановлення зв'язку:

- якщо $t_{iv} \leq t_{доп}$, то ІВ успішно встановлена в межах допустимого часу;
- якщо $t_{iv} > t_{доп}$, то зв'язок встановлено, але з низькою якістю обслуговування; це особливо критично для даних термінової доставки, оскільки вони можуть втратити свою актуальність;
- якщо кількість колізій $n_c > n_{доп}$, то з'єднання не вдалося встановити, що свідчить про невдалі спроби передачі даних через перевищення допустимої кількості колізій.

Таким чином, час встановлення та кількість колізій є ключовими параметрами для оцінки якості обслуговування в мережах Інтернету речей.

Вхідними даними для моделювання процесу встановлення інформаційної взаємодії є:

- множина логічних каналів L_{ij} , які можуть бути побудовані від джерела i до адресата j . Це набір можливих маршрутів для передачі даних;
- характеристика фізичних каналів, що включає час передачі сигналу-виклику по фізичному каналу в прямому та зворотному напрямках;
- ймовірність повної зайнятості фізичних каналів (тобто, ймовірність того, що канал не доступний для передачі даних);
- допустимий час для встановлення ІВ;
- кількість спроб встановлення ІВ, тобто кількість можливих повторних спроб, якщо з'єднання не було встановлено з першого разу;
- час на повторну спробу, який включає перемикання на інший логічний канал при невдалому встановленні з'єднання.

У моделі накопичуються статистичні дані, які дозволяють оцінити ймовірність встановлення ІВ у межах допустимого часу $t_{доп}$ та середні та середньоквадратичні значення часу встановлення ІВ t_{iv} , що характеризують процес встановлення ІВ в мережі Інтернету речей.

Ці статистичні показники дають змогу аналізувати ефективність встановлення зв'язку та оцінювати якість обслуговування в мережах IoT.

На всій множині логічних каналів L_{ij} , виконується їх упорядкування за кількістю зайнятих фізичних каналів c , тобто за принципом $c = c_{min}, \dots, c_{max}$. В окремому експерименті визначається кількість зайнятих фізичних каналів з множини L_{ij} , після чого на отриманій реалізації імітується процес проходження виклику від джерела i до адресата j . Після встановлення ІВ фіксуються такі величини:

- $n_{тр}$ – кількість успішно переданих запитів;
- $n_{от}$ – кількість отриманих відповідей;
- $n_{п}$ – кількість колізій або перешкод, що виникли під час передачі.

Ця процедура повторюється N разів для збору статистичних даних. На основі отриманих результатів розраховується середнє значення часу встановлення ІВ, що дозволяє оцінити ефективність зв'язку в мережі Інтернету речей.

Реалізація кількості втрачених фізичних каналів c здійснюється шляхом випадкового вибору номерів каналів із множини можливих каналів d , $c \in d$. Номер чергового втраченого фізичного каналу z визначається за формулою:

$$z = [Ud + 1], \quad (3)$$

де U – випадкове число, $U \in [0,1]$, отримане за допомогою датчика випадкових чисел. Оператор $[]$ означає округлення до найближчого цілого числа з недоставею.

Після визначення номера каналу z , цьому фізичному каналу присвоюється значення «1» у множині L_{ij} , що означає його зайнятість або втрату. Процедура визначення z повторюється s раз для всіх втрачених каналів.

Задача розрахунку характеристик встановлення інформаційної взаємодії зводиться до задачі оцінки математичного очікування $M\xi$ дискретної випадкової величини $\xi = f(\alpha)$, де $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_d)$ – це вектор параметрів, що має відомий закон розподілу ймовірностей p (тобто $\alpha \sim p$). Випадкова величина ξ може приймати два значення $\xi \in \{0,1\}$, де:

- $\xi = 0$ відповідає успішному встановленню з'єднання;
- $\xi = 1$ – не встановленню з'єднання.

Математичне очікування $M\xi = P\{\xi = 1\}$ має сенс ймовірності неуспішного встановлення з'єднання. При цьому випадкова величина ξ є не виродженою, що означає, що $0 < M\xi < 1$, тобто існує певна ймовірність як успішного, так і неуспішного встановлення з'єднання.

Цей підхід дозволяє оцінити ймовірність невдачі при встановленні ІВ і є корисним для аналізу ефективності роботи мережі Інтернету речей, де встановлення з'єднань може бути випадковим і залежати від різних факторів [7].

Випадкову величину α можна інтерпретувати як вектор $\alpha = (\alpha_1^v, \dots, \alpha_d^v)$, що відображає стан фізичних каналів у множині L_{ij} в контексті їх доступності: канал є або його немає. Кожна випадкова величина $\alpha_i^v \in \{0,1\}$, $i = \overline{1,d}$, d – число фізичних каналів в множині L_{ij} . $\alpha_i^v = 1$ означає втрату i -го фізичного каналу зі швидкістю v .

Вважається, що випадкові величини α_i^v незалежні, і якщо α має кінцеву множину значень $\alpha \in X$, де $X = \{x_j; j = 1, \dots, n; n = 2^d\}$, то розподіл $p(x)$, $x \in X$, задається набором ймовірностей $p(x_j = P\{\alpha = x_j\} = p_j \geq 0, j = \overline{1,n})$.

З урахуванням класифікації множини L_{ij} за кількістю зайнятих каналів c , оцінку математичного очікування $M\xi$ можна представити у вигляді суми:

$$M\xi = \sum_{c_{min}}^{c_{max}} M\xi(c), \quad (4)$$

де $M\xi$ — це ймовірність неуспішного встановлення ІВ за наявності c фізичних каналів, що не можуть проводити виклик. Ця сума дозволяє оцінити загальну ймовірність невдачі в процесі встановлення зв'язку в мережі Інтернету речей.

Для задання станів $L_{ij}(c)$ на k -му випробуванні використовується випадковий вибір фізичних каналів c , які не проводять виклик на встановлення інформаційної взаємодії. У результаті вектор α набуває конкретної реалізації x , що містить c одиниць (канали, які зайняті) і $(d - c)$ нулів (вільні канали). Згідно з правилом проходження виклику через множину альтернативних логічних каналів L_{ij} та правилом встановлення ІВ, обчислюється значення:

$$\xi(x|c)_k = f[L_{ij}^k], \quad (5)$$

де $\xi(x|c)_k$ – результат встановлення або не встановлення ІВ на k -му випробуванні (для k -ої реалізації множини L_{ij}), $\xi(x|c)_k \in (0,1)$, і ймовірність отриманої реалізації $p(x) = f[L_{ij}^k]$.

Значення $\xi(x|c)_k = 1$ має місце в наступних випадках:

- сигнал виклику не досяг адресата, тобто жоден логічний канал з множини L_{ij} не був побудований успішно;
- кількість спроб перевищила допустиме значення, що означає, що з'єднання не вдалося встановити в межах допустимих спроб;
- інформаційна взаємодія була встановлена, але з низькою якістю обслуговування –

це означає, що час встановлення ІВ $t_{ів}$ перевищив допустимий час $t_{доп}$, що є критичним для термінової передачі даних.

Оцінка ймовірності неуспішного встановлення ІВ між СП при наявності с втрачених фізичних каналів на множині всіх логічних каналів L_{ij} може бути виражена наступним чином:

$$M\xi(c) = \frac{C_d^c}{N_{2c}} \sum_{k=1}^{N_{2c}} p(L_{ij}^k | \xi(x|c) = 1), \quad (6)$$

де N_c – число розіграних станів (реалізацій) множини L_{ij} .

Ймовірність $p(L_{ij})$ розраховується за формулою:

$$p(L_{ij}) = \prod_{i=1}^h p(\alpha_i = 1) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{d-h} [1 - p(\alpha_i = 1)], \quad (7)$$

Ймовірності $p(\alpha_i = 1), i = \overline{1, d}$ задаються під час вирішення задачі розподілу потоків.

Остаточна оцінка ймовірності неуспішного встановлення з'єднання між парою (i, j) матиме наступний вигляд:

$$M\xi(c) = \sum_{c=c_{min}}^{c_{max}} \frac{C_d^c}{N_c} p(L_{ij}^k | \xi(x|c) = 1), \quad (8)$$

Таким чином, вираз (8) повністю відображає ймовірнісний підхід до встановлення інформаційної взаємодії в мережах Інтернету речей з топологією mesh.

Для оцінки ймовірнісно-часових характеристик доставки даних використовують математичний апарат систем масового обслуговування (СМО) (рис. 1) [8]. Особливості застосування теорії СМО для моделювання обчислювальних мереж вимагають врахування різних типів взаємодії між окремими СМО, які моделюють вузли мережі. Основний вид взаємодії між вузлами – це послідовне поетапне обслуговування. У випадку встановленого з'єднання така взаємодія відображається у вигляді ланцюжка сенсорних пристроїв.

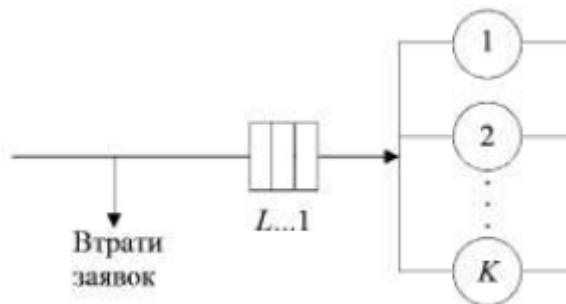


Рис. 1 Графічне позначення СМО [8]

Система масового обслуговування характеризується такими параметрами:

$A(t)$ – функція розподілу інтервалів часу між надходженнями заявок, де $0 \leq t$;

$B(t)$ – функція розподілу часу обслуговування заявок;

K – кількість каналів обслуговування, $K \geq 1$;

L – довжина черги, $0 \leq L \leq \infty$.

Ці параметри є ключовими для моделювання та оцінки ефективності роботи мережі Інтернету речей.

Характеристики, які оцінюються за допомогою СМО включають: $P(n)$ – ймовірність втрати заявки; $T_{оч}$ – середній час очікування; L – середню кількість заявок у черзі; M – середню кількість заявок у системі.

У теорії СМО для оцінки продуктивності використовується апарат перетворення Лапласа-Стілтєса (ПЛС). Перетворенням Лапласа-Стілтєса випадкової величини x з функцією розподілу $B(x)$ називають функцію $\beta(s)$, яка визначається так:

$$\beta(s) = \int_0^{\infty} e^{-sx} dB(x), \quad (9)$$

де $s \geq 0$ – параметр ПЛС.

Якщо x – неперервна випадкова величина, то ПЛС

$$\beta(s) = \int_0^{\infty} e^{-sx} dB(x)d(x), \quad (10)$$

Для оцінки ймовірнісно-часових характеристик застосовуються такі відомі властивості перетворення Лапласа-Стілтєса:

1. ПЛС суми незалежних випадкових величин дорівнює добутку ПЛС кожної з цих величин, тобто, якщо дві незалежні випадкові величини мають ПЛС функцій розподілів $\beta_1(s)$ і $\beta_2(s)$, то ПЛС функції розподілу їх суми дорівнює $\beta_1(s)\beta_2(s)$.

2. Якщо B_k – це k -й момент випадкової величини щодо початку координат, то

$$B_k = (-1)^k \frac{d^k \beta(s)}{ds^k} \Big|_{s=0}, \quad (11)$$

тобто, моменти випадкової величини можна отримати шляхом багаторазового диференціювання перетворення Лапласа-Стілтєса її функції розподілу в точці $s = 0$. Перший центральний момент характеризує математичне сподівання цієї випадкової величини,

$$\bar{t} = \beta = \frac{\beta(s)}{ds}, \quad (12)$$

а другий центральний момент використовується для обчислення дисперсії випадкової величини.

$$\sigma^2 = B_2 - B_1^2 = \frac{d^2 \beta(s)}{ds^2} \Big|_{s=0} - \left[-\frac{d\beta(s)}{ds} \Big|_{s=0} \right]^2. \quad (13)$$

3. $\lim_{s \rightarrow 0} \beta(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} B(t)$.

4. Величина $e^{-sx}B(x_i)$ є ймовірністю складної події, яка полягає в тому, що випадкова величина не перевищить значення x_i (співмножник $B(x_i)$), і до того ж, на інтервалі $[0, x_i]$ не відбудеться жодної «катастрофи» (співмножник e^{-sx}). Параметр s інтерпретується як інтенсивність «катастроф». Інтегрування по всьому діапазону дає $\int_0^{\infty} e^{-sx} dB(x) = \beta(s)$.

Таким чином, перетворення Лапласа-Стілтєса при оцінці середнього часу затримки $t_{пд}$ має ймовірнісний сенс: воно визначає ймовірність того, що за час $t_{доп}$ вдасться передати всі необхідні дані.

У контексті Інтернету речей час передачі даних описується через перетворення ПЛС [4]. Передача між елементами відбувається одночасно в K незалежних пуассонівських потоках даних, кожен з яких має інтенсивність $\lambda_k, k = 1, \dots, K$, і обробляється за довільним законом. Тобто кожний сегмент маршруту моделюється як система масового обслуговування типу $M|G|1$.

Для системи $M|G|1$ використовується рівняння Поллачека-Хинчина для ПЛС функції

розподілу часу очікування $W(s)$

$$W(s) = \frac{s(1 - \rho)}{s - \lambda + \lambda\beta(s)}, \quad (14)$$

де ρ – коефіцієнт завантаження каналу; λ – інтенсивність надходження пакетів, а $\beta(s)$ – ПЛС часу обробки пакета на серверному пристрої. Щоб обчислити $W(s)$, потрібно знайти ПЛС функції розподілу часу обробки пакета $\beta(s)$. Для випадкової величини t , яка представляє час обробки пакета, з експоненційним розподілом ймовірностей

$$B_k(t) = 1 - e^{-\mu_k t}, \quad (15)$$

де $\mu_k = C/l_k$ – пропускна здатність серверного пристрою в пакетах/с; C – пропускна здатність СП в бітах/с; l_k – довжина пакета даних k -го класу в бітах, де $k = 1, \dots, K$.

Перетворення Лапласа-Стілтєса

$$\beta(s) = \frac{\mu}{(\mu + s)} = \frac{1}{(1 + st)}. \quad (16)$$

Для випадкової величини t з рівномірною функцією розподілу

$$B_k(t) = \frac{t - \alpha}{b - \alpha}, \text{ при } \alpha \leq t \leq b, \quad (17)$$

Перетворення Лапласа-Стілтєса

$$\beta(s) = \frac{e^{-s\alpha} - e^{-sb}}{s(b - \alpha)}. \quad (18)$$

Відповідно до розглянутих властивостей ПЛС тривалість передачі даних k -го класу від вузла i до вузла j визначається як

$$\beta_k(t) = \prod_{d=1}^N W_d(t) \beta_d(t), \quad (19)$$

де $\beta_d(t)$ – ПЛС функції розподілу часу обробки пакета в d -му каналі маршруту; $W_d(t)$ – ПЛС функції розподілу часу очікування $W(s)$ в d -му каналі маршруту.

Таким чином, цей розподіл часу передачі залежить від векторів інтенсивностей надходження та обслуговування пакетів і визначається як функція $\beta_k(t) = f(\lambda_k, \mu_k)$.

Метод забезпечує розподіл часу перебування даних k -го класу в мережі Інтернету речей, враховуючи заданий вектор ймовірностей виникнення помилок на елементах маршруту для всіх пар взаємодіючих серверних пристроїв. Перетворення Лапласа-Стілтєса дозволяє, при встановлених обмеженнях на час $t_{\text{доп}}$ для часу $t_{\text{пд}}$ певного маршруту, оцінити можливе навантаження на цей маршрут і вибрати відповідний алгоритм самоорганізації мережі [9].

Висновки и і перспективи подальших досліджень.

У статті розглянуто актуальні аспекти моделювання інформаційної взаємодії в мережах Інтернету речей з топологією mesh. Показано, що проектування IoT-систем вимагає врахування низки задач, серед яких ключовим є створення моделей, здатних прогнозувати поведінку систем за умов реального трафіку.

Запропонована ймовірнісна модель взаємодії враховує фундаментальні характеристики IoT, зокрема несправність каналів зв'язку, обмежену кількість спроб встановлення з'єднань та альтернативні маршрути. Це дозволяє оцінювати абсолютні ймовірнісні характеристики взаємодії, забезпечуючи ефективне проектування систем.

Використання апарату перетворення Лапласа-Стілтєса запропоновано для оцінки часу

передачі даних і ймовірності їх успішної доставки. Метод забезпечує розподіл часу перебування даних різних класів у мережі IoT та дозволяє оцінити допустиме навантаження на маршрути за заданими часовими обмеженнями.

Розроблена модель сприяє підвищенню ефективності функціонування IoT-мереж шляхом оптимального вибору алгоритмів самоорганізації. Її використання актуальне для вирішення складних завдань, що вимагають значних обчислювальних ресурсів, таких як обробка даних у реальному часі із залученням хмарних сервісів [10].

Отримані результати можуть бути використані на етапах проектування і вдосконалення IoT-систем.

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.
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.
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.
4. Kurose, J.F., Ross, K.W. "Computer Networking: A Top-Down Approach". — Pearson, 2017. 864 pages.
5. 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.
6. Laroui M., Nour B., Mounjla 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.
7. 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.
8. 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.
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.
10. Муляр І., Селюков О., Джулій В., & Кізіон Б. Модель оцінки ймовірнісно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі Інтернет речей // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2019. – № 63. – С. 96–107.

References

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.
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.
4. Kurose, J.F., Ross, K.W. "Computer Networking: A Top-Down Approach". — Pearson, 2017. 864 pages.

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Dovhyi S.O., Zghurovskyi M.Z., Lahutin A.A. "Information and Communication Systems: Fundamentals of Design and Prospects for Development". – Kyiv: National Technical University of Ukraine "KPI", 2016. – 450 p.
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.
10. Mulyar I., Selyukov O., Dzhuliy V., & Kizyun B. **A model for assessing the probabilistic and temporal characteristics of information interaction in the Internet of Things network** // *Collection of scientific papers of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*. – 2019. – No. 63. – P. 96–107.