

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЙМОВІРНІСНО-ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

В статті запропоновано підхід до визначення оцінки ймовірнісно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей.

Проектування систем інтернет речей (IoT) пов'язане з низкою задач, які вимагають моделювання процесів інформаційної взаємодії, що дозволить при прогнозованому трафіку будувати оптимальні режими функціонування подібних систем.

Основна ідея інтернет речей полягає в організації взаємодії різноманітних предметів в навколишньому середовищі, передачі інформації, що генерується цими речами і надання безперебійного з'єднання. З урахуванням новизни предметної області, фундаментальних характеристик і складності організації IoT, основним засобом дослідження на ранніх етапах проектування інтернет речей є моделювання і відповідні алгоритми, що визначають актуальність роботи.

Запропонована ймовірнісна модель встановлення інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей за топологією mesh, заснована на мультиагентному підході, побудована з урахуванням фундаментальних характеристик технології інтернет речей. Модель дозволяє оцінити абсолютні та ймовірнісні характеристики інформаційної взаємодії. У моделі враховані умови, відповідні реальному процесу інформаційної взаємодії - наявність непрацездатних каналів і точок доступу, обмежена кількість повторних спроб встановлення з'єднань, наявність альтернативних маршрутів.

Для оцінки часу передачі даних запропоновано застосувати апарат перетворення Лапласа-Стілт'єса. Перший центральний момент ПЛС дозволяє визначити середній час передачі даних за встановленою інформаційною взаємодією. Ймовірнісний сенс ПЛС дозволяє виконати оцінку ймовірності доставки даних. Метод надає розподіл часу перебування даних k -го класу в мережі інтернет речей, при заданому векторі ймовірностей виникнення помилок на елементах маршруту для всіх пар взаємодіючих сенсорних пристроїв. ПЛС дозволяє при обмеженнях t_{don} на час t_{no} деякого маршруту визначити можливе навантаження на цей маршрут і здійснити вибір відповідного алгоритму самоорганізації мережі.

Ключові слова: інтернет речі, хмарні обчислення, ймовірнісна модель, туманні обчислення, сенсорний пристрій, інформаційна взаємодія.

Вступ. Однією з ключових сучасних проблем забезпечення зростання ефективності всіх галузей є необхідність розвитку і впровадженню в них інформаційних технологій.

Програма «Цифрова економіка», в роботі над якою взяли участь близько 150 експертів з різних сфер науки і економіки, орієнтована на зростання ефективності всіх галузей завдяки швидкому розвитку і впровадженню в них інформаційних технологій. Програма містить дев'ять напрямків: регулювання, інформаційна інфраструктура, дослідження та розробки, система управління, кадри і освіта, інформаційна безпека, державне управління, "розумне місто" і цифрова охорона здоров'я. Кожен напрямок планується реалізувати з застосуванням нових концепцій побудови обчислювальних мереж, однією з яких є технологія інтернет речей. В даний час технологія інтернет речей (IoT, Internet of Things) виглядає багатообіцяючою в різних областях індустрії - виробництві, логістиці, медицині, енергетиці, транспорті, міському господарстві, управлінні надзвичайними ситуаціями. Області застосування технології IoT продовжують стрімко рости [1].

Основна ідея інтернет речей полягає в організації взаємодії різноманітних предметів в навколишньому середовищі, передачі інформації, що генерується цими предметами і надання безперебійного з'єднання. Взаємодія речей здійснюється за допомогою вже наявних і розроблюваних інформаційно-комунікаційних технологій.

Хмарні технології в інтернет речей поділяються на хмарні обчислення (Cloud Computing) і туманні обчислення (Fog Computing) [2].

Хмарні обчислення – це модель забезпечення зручного мережевого доступу на вимогу до деякого загального фонду конфігуруємих обчислювальних ресурсів, наприклад, мереж передачі даних, серверів, пристроїв зберігання даних, додатків і сервісів – як разом, так і окремо, які можуть бути оперативно надані провайдером з мінімальними експлуатаційними витратами. Хмарні обчислення реалізуються мережевою інфраструктурою центрів обробки даних (ЦОД).

Туманні обчислення - це різновид хмарних сервісів, розташованих не в «хмарі», а в навколишньому середовищі, наприклад, на сусідньому сервері. Туманні обчислення реалізуються локальними мережами, з яких інтегруються інтернет речі (рис. 1).

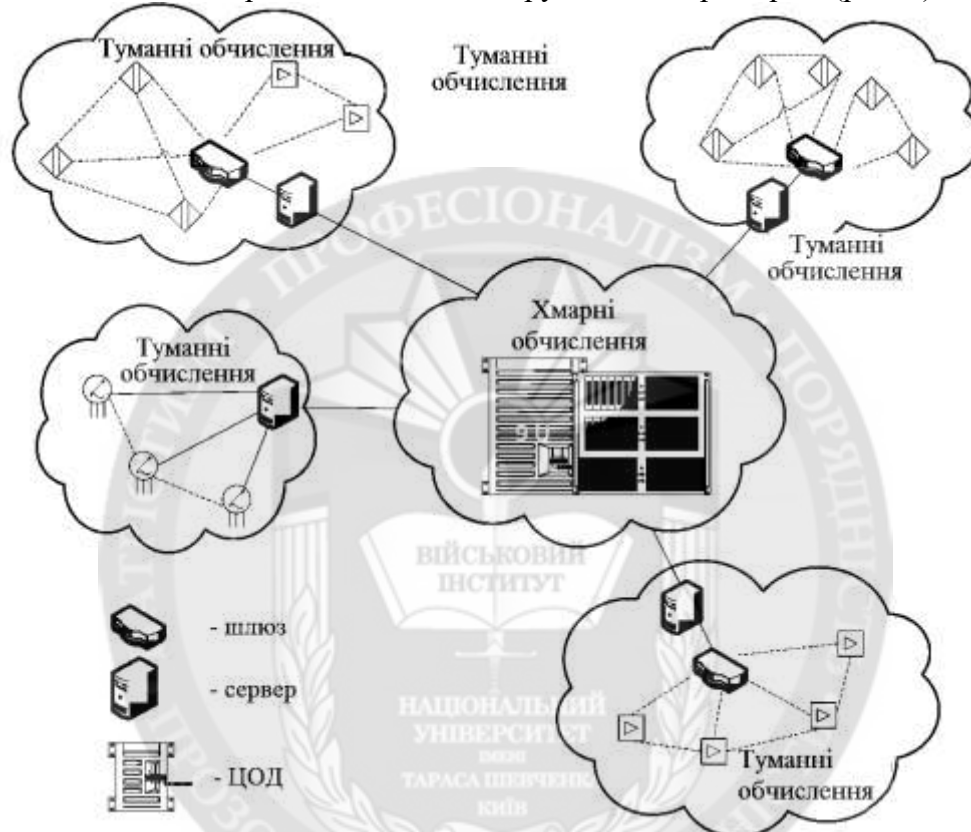


Рисунок 1 - Туманні і хмарні обчислення в концепції інтернет речей

Fog Computing є доповненням до Cloud Computing при реалізації задач, що вимагають значних комп'ютерних ресурсів. Концепція туманних обчислень передбачає децентралізацію обробки даних за рахунок передачі частини роботи з обробки даних з «хмари» безпосередньо обчислювальним ресурсам локальної сенсорної мережі - «туману» [3] Туманні обчислення можна визначити, як деяку віртуальну платформу, що підтримує три основних типи сервісів: обчислення, зберігання та передачу. Задача туманних обчислень полягає в забезпеченні взаємодії множини сенсорних пристроїв (СП) між собою і з хмарою, тобто центром обробки даних (ЦОД).

Число елементів в «тумані» є не постійним і, в загальному випадку, може змінюватися в межах від 0 до N_{max} . «Туманні обчислення» є бездротовими сенсорними мережами, характеризуються самоорганізацією, в яких немає загальної інфраструктури за винятком шлюзів для зв'язку з іншими мережами. Кожен з вузлів сенсорної мережі повинен мати можливість функціонувати як крайовий і як транзитний вузол [4]. Передача даних в сенсорних мережах здійснюється шляхом їх перенаправлення до найближчого вузла крок за кроком. Шлюз в «туманних обчисленнях» грає роль агрегуючого вузла - накопичує дані від різних СП для подальшої передачі на сервер і роль координатора сенсорної мережі .

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як технологію інформаційних комунікацій інтернет речей можна записати у вигляді такої символічної формули: IoT = Сенсори (датчики) + Дані + Мережі + Послуги [5, 6].

До існуючих вимог технологій інфокомунікації і взаємодії, таких як забезпечення зв'язку "в будь-якому місці" і "в будь-який час", в просторі інтернет речей з'являється ще одна - "зв'язок з будь-якою річчю". Під даною вимогою розуміють, як взаємодію між речами, так і між річчю і людиною [2, 7].

Концепція інтернет речей включає не тільки збір даних з віддалених і відстежуваних об'єктів, не тільки управління цими об'єктами, але і обмін інформацією об'єктів між собою, перерозподіл задач, планування з урахуванням доступності тих чи інших сервісів в зоні охоплення об'єкта [8, 9]. Інтернет речі повинні мати можливість самоорганізовуватися, об'єднуючись в локальні бездротові мережі, вирішуючи спільні задачі. Інтернет речами можуть вирішуватися складні задачі, які вимагають значних обчислювальних ресурсів. Наприклад, обробка відео в реальному масштабі часу, коли локальна бездротова мережа використовує обчислювальні ресурси хмари [12].

Таким чином, з урахуванням новизни предметної області, фундаментальних характеристик і складності організації IoT, основним засобом дослідження на ранніх етапах проектування інтернет речей є моделювання і відповідні алгоритми, що визначають актуальність роботи [3, 4].

Постановка задачі. Специфіка інформаційної взаємодії речей визначається фундаментальними характеристиками IoT. Відповідно до рекомендацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-Т) до їх числа відносяться:

1. Можливості підключення - метрика самоорганізованих мереж, що впливає на тривалість життєвого циклу бездротової сенсорної мережі поряд з мобільністю, енергоефективністю і покриттям. МСЕ-Т визначає характеристику зв'язності як можливість будь-якої речі бути пов'язаною з глобальною інфокомунікаційною структурою.

2. Забезпечення речей послугами - надання мережевих послуг без обмежень, в тому числі автономно для фізичних і віртуальних речей.

3. Гетерогенність – характеристика інтернет речей, що визначає побудову IoT-пристроїв на різних апаратних, програмних платформах і мережах. Пристрої також повинні мати можливість взаємодіяти з іншими пристроями через різні мережі зв'язку.

4. Динамічні зміни - характеристика, яка визначає динамічні зміни статусу речей, наприклад, від сплячих до активних, від пов'язаних в певний момент часу з мережею - до непов'язаних і т.д. Число речей, місце розташування, швидкість і т.п., також можуть змінюватися динамічно. Саме ця фундаментальна характеристика інтернет речей призводить до необхідності перегляду принципів побудови мережі від існуючих інфраструктурних до самоорганізуючих. Самоорганізація охоплює не тільки випадкове число вузлів і взаємозв'язків між ними, але і самоврядування, самоконфігурацію, самотестування, самозахист, оптимізацію і т.п.

5. Величезне число речей – характеристика, яка базується на прогнозних оцінках, відповідно до яких мова йде про десятки трильйонів речей і про трильйони мереж.

Перераховані особливості не дозволяють застосовувати методи і алгоритми, на базі яких функціонують традиційні комп'ютерні мережі до інтернет речей. Цьому є кілька причин: зв'язність і динамічні зміни робить топологію мережі нерегулярною, використання бездротових технологій, «туманних» і «хмарних» обчислень викликає появу колізій джерел даних при доступі до ресурсів інтернет речей, а гетерогенність і вимога енергоефективності впливають на ймовірно-часові характеристики інформаційної взаємодії в інтернет речей.

Дані обставини необхідно враховувати при проектуванні інтернет речей і з урахуванням специфіки роботи шукати нові методи і алгоритми, що дозволяють отримувати оптимальні рішення по організації інформаційної взаємодії при заданих умовах функціонування інтернет речей

При вирішенні поставленої задачі засобами моделювання будемо оцінювати функціональну залежність між набором параметрів P , які задають мережу інтернет речей кількісно і ймовірісно-часовими характеристиками H , що описують інформаційну взаємодію якісно, тобто формально $H = f(P)$. Це дозволить при різних умовах вирішувати три види задач моделювання, необхідних при проектуванні:

- пряму - оцінювати характеристики при наявних параметрах мережі інтернет речей;
- зворотню - при заданих допустимих значеннях параметрів проектувати мережу інтернет речей з елементів з відповідними параметрами і налаштуваннями;
- будувати моделі, засновані на методах і алгоритмах, що дозволяють виявити функціональну залежність між множинами P і H .

До множини параметрів P віднесемо поточкові і структурні метрики: кожен СП характеризується інтенсивністю ідентифікації себе в просторі інтернет речей, періодами активності і пасивності; кожен вузол інтернет речей задається параметрами продуктивності; структура зв'язків відповідає топології mesh; елементи зв'язків СП-вузол і вузол-вузол задаються часом передачі виклику в прямому і зворотному напрямках, значеннями ймовірностей зайнятості або відсутності зв'язку.

Мережа побудована як сукупність «туманів», на які поділяється територія покриття, кількість «туманів» теоретично не обмежена. В одному такому «тумані» може розміщуватися кілька шлюзів, які підключаються до магістрального інформаційного каналу за допомогою оптичного або електричного кабелю або по радіоканалу з використанням систем широкосмугового доступу [2].

Шлюзи в «тумані» з'єднуються між собою по радіоканалу. Протоколи, які реалізують функції транспортування в mesh-мережі засновані на створенні таблиці маршрутизації з контролем стану транспортного каналу і підтримкою динамічної маршрутизації, що дозволяє кожному з них відправляти трафік за оптимальним маршрутом між сусідніми вузлами [3, 11]. При втраті будь-якого з вузлів відбувається автоматичне перенаправлення трафіку за іншим маршрутом, що гарантує не тільки доставку трафіку, а доставку за мінімальний час. В умовах різких стрибків трафіку як всередині мережі, так і на її границях проблема може вирішуватися установкою нових шлюзів в межах сенсорної мережі, інтеграція яких в існуючу мережу відбувається автоматично. Збільшення зон покриття зводиться до додавання в мережу нових СП і шлюзів, що відбувається так само автоматично і таким чином виконується масштабування мережі інтернет речей.

Основна частина. В бездротових сенсорних мережах число СП в залежності від розв'язуваної задачі може змінюватися від кількох сотень до тисяч. Не випадково, в специфікаціях Zig Bee число СП, розташованих в одній зоні, може досягати 64000. Мережі великого масштабу і високої щільності з лімітованою пропускною здатністю повинні, до того ж, надавати послуги з певним рівнем якості обслуговування. На відміну від традиційних мереж, бездротові сенсорні мережі організовуються випадковим чином, і взаємозв'язки СП в них також випадкові у часі. Сенсорні вузли можуть виходити з ладу внаслідок недостатнього рівня електроживлення, виникнення критичних умов у зовнішньому середовищі, виходу з ладу апаратної частини і т.д. Якщо вийшло з ладу кілька сенсорних вузлів, це не повинно викликати істотних наслідків як для сенсорної мережі в цілому, так і для її фрагментів. Іншими словами, мережа інтернет речей повинна бути нечутлива до відмови будь-якого СП і продовжувати підтримувати далі необхідний рівень якості обслуговування.

Для обчислювальних мереж якість обслуговування виражається в ймовірісно-часових характеристиках [11]. Відповідно до моделі інформаційної взаємодії, оцінка ймовірісно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей буде представляти суму:

$$t_{ig} = t_{ez} + t_{nd}, \quad (1)$$

де t_{ie} - час інформаційної взаємодії; t_{e3} - час, необхідний на встановлення з'єднання для інформаційної взаємодії; t_{nd} - час передачі даних по встановленому з'єднанню інформаційної взаємодії.

Для оцінки t_{e3} застосуємо вірогідну модель встановлення з'єднання з додатком на мережі інтернет речей. Оцінку t_{nd} пропонується виконати із застосуванням апарату систем масового обслуговування.

Особливості реалізації імітаційної моделі встановлення з'єднання. Процес встановлення інформаційної взаємодії (ІВ) в мережі інтернет речей може займати деякий час в силу її динамічних властивостей: топологія мережі може багаторазово змінюватися в процесі функціонування внаслідок введення нових вузлів, відмов існуючих, критичних змін зовнішнього середовища. Всі ці можливості повинні бути враховані при розробці моделі встановлення з'єднання для інформаційної взаємодії [12].

Встановити інформаційну взаємодію - це означає побудувати логічний канал, що зв'язує сенсорний пристрій зі шлюзом адресата для подальшої передачі по ньому даних. Таких логічних каналів, що зв'язують джерело і адресат, може бути кілька в силу mesh-топології мережі інтернет речей (рис. 2).

Логічний канал складається з фізичних каналів, що зв'язують сусідні СП. Побудова логічного каналу виконується посилкою керуючого сигналу-виклику на встановлення з'єднання. При проходженні виклику від одного СП до іншого стан фізичного каналу приймає одне з двох станів: «1» - канал зайнятий, і дані по ньому не пройдуть, або «0» - канал вільний для передачі даних.

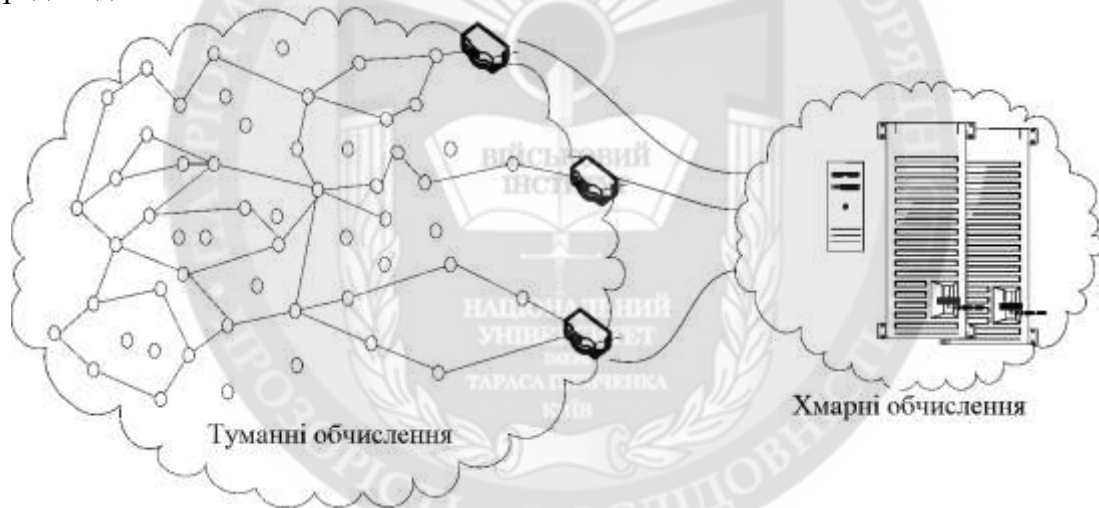


Рисунок 2 - Логічні канали для передачі даних від СП в «хмару»

Повторні спроби встановлення з'єднання надають стохастичність цього процесу, тому що виникають вимушені повернення на попередні СП і число фізичних каналів, пройдених викликом при його доставці адресату, виявляється випадковим числом. Врахування даного аспекту дозволяє звернутися до імітаційного моделювання процесу встановлення логічного каналу для інформаційної взаємодії.

Таким чином, час встановлення інформаційної взаємодії t_{ie} визначимо як випадкову величину, яка може бути знайдена виразом

$$t_{ie} = \sum_{i=1}^{n_k} t_{ki} + \sum_{i=1}^{n_n} t_{ni} + n_c t_c, \quad (2)$$

де n_k - число фізичних каналів в логічному каналі, побудованого від СП джерела до СП-адресату; n_n - число фізичних каналів, на які виклик повернувся назад при пошуку альтернативного логічного каналу; n_c - число спроб в зафіксованій реалізації процесу

встановлення ІВ, в загальному випадку $0 \leq n_c < n_{don}$, де n_{don} – допустима кількість спроб встановлення ІВ; t_{k_i} – час проходження i -го фізичного каналу; t_{n_i} – час зворотного проходження i -го фізичного каналу; t_c – час перемикавання на інший логічний канал.

Кожен експеримент на імітаційній моделі дає реалізацію трьох випадкових величин: n_k , n_n і n_c , що дозволяє оцінити час встановлення інформаційної взаємодії t_{ie} відповідно до виразу (2).

Отримане значення t_{ie} визначає результат встановлення ІВ: якщо $t_{ie} \leq t_{don}$, то ІВ встановлено; якщо $t_{ie} > t_{don}$, то ІВ встановлено, але з низькою якістю обслуговування, і для даних термінової доставки це має критичне значення, тому що вони могли втратити свою актуальність; якщо $n_c > n_{don}$, то з'єднання не встановлено.

Вхідними даними для моделювання є: множина логічних каналів, які можуть бути побудовані від джерела i до адресата j - позначимо, як L_{ij} ; характеристика фізичних каналів: час передачі сигналу-виклику по фізичному каналу в прямому і зворотному напрямках; значення ймовірностей повної зайнятості фізичних каналів; допустимий час встановлення ІВ; число спроб встановлення ІВ; час, виділений на повторну спробу - перемикавання на інший логічний канал.

У моделі накопичуються статистики, що дозволяють оцінити ймовірність встановлення ІВ за час, що не перевищує допустимий, а також середні і середньоквадратичні значення t_{ie} , що характеризують процес встановлення ІВ в мережі інтернет речей.

На всій множині логічних каналів L_{ij} проводиться їх упорядкування по числу зайнятих фізичних каналів c , тобто ($c = c_{\min}, \dots, c_{\max}$). В окремому експерименті розігрується число з номерів зайнятих фізичних каналів в множині L_{ij} і на отриманій реалізації імітується процес проходження виклику джерела i до адресата j . За фактом встановлення ІВ фіксуються значення n_{mp} , n_{om} і n_n . Процедура повторюється N раз. За результатами експериментів обчислюється середня оцінка часу встановлення ІВ.

Реалізація кількості втрачених фізичних каналів c зводиться до «вибору довільно» номерів каналів з d можливих, $c \in d$. Черговий номер втраченого фізичного каналу z визначається за формулою $z = \lceil Ud + 1 \rceil$, де U – випадкове число, $U \in [0,1]$, що отримується шляхом звернення до датчика випадкових чисел. Дужки $\lceil \rceil$ означають округлення в меншу сторону. Фізичному каналу з номером z присвоюється «1» в множині L_{ij} . Процедура визначення z повторюється c раз.

Задача розрахунку характеристик встановлення ІВ може бути зведена до задачі оцінювання математичного очікування $M\xi$ дискретної випадкової величини $\xi = f(\alpha)$, де $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_d)$ має закон розподілу ймовірностей p (тобто $\alpha \sim p$), який відомий. Випадкова величина ξ приймає два значення, тобто $\xi \in \{0,1\}$: $\xi=0$ відповідає встановленню з'єднання; $\xi=1$ – не встановленню з'єднання. Значення $M\xi = P\{\xi=1\}$ має сенс ймовірності не встановлення з'єднання. Випадкова величина ξ не вироджена, тобто $0 < M\xi < 1$.

Інтерпретуємо випадкову величину α як вектор $\alpha = (\alpha_1^v, \dots, \alpha_d^v)$, що відображає стан фізичних каналів, які входять в множину моделювання L_{ij} в сенсі їх статусу: є чи ні. Випадкова величина $\alpha_i^v \in \{0,1\}$, $i = \overline{1,d}$, d – число фізичних каналів в множині L_{ij} . Значення $\alpha_i^v = 1$ має сенс втрати i -го фізичного каналу зі швидкістю v . Випадкові величини α_i^v вважаються незалежними, якщо α має кінцеву множину значень $\alpha \in X$,

$X = \{x_j; j = 1, \dots, n; n = 2^d\}$. Для неї розподіл $\rho(x)$, $x \in X$ задається набором ймовірностей $p(x_j) = P\{\alpha = x_j\} = p_j \geq 0$, $j = \overline{1, n}$. З урахуванням класифікації L_{ij} по с оцінку $M\xi$ знайдемо у вигляді:

$$M\xi = \sum_{c_{\min}}^{c_{\max}} M\xi(c), \quad (3)$$

де $M\xi$ – оцінка ймовірності не встановлення ІВ при наявності с фізичних каналів, що не проводять виклик.

Для завдання станів $L_{ij}(c)$ на k -му розіграві застосовується випадковий вибір номерів фізичних каналів c , не проводячих виклик на встановлення ІВ. В результаті вектор α отримує конкретну реалізацію x , що містить с одиниць і $(d-c)$ нулів. Відповідно до правила проходження виклику по множині альтернативних логічних каналів L_{ij} і правилом встановлення ІВ обчислюється значення

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

де $\xi(x|c)_k$ – результат встановлення (не встановлення) ІВ при k -му випробуванні (k -й реалізації L_{ij}), $\xi(x|c)_k \in (0,1)$, і ймовірність отриманої реалізації

$$p(x) = p[L_{ij}^k].$$

Значення $\xi(x|c)_k = 1$ має місце, якщо сигнал виклику не дійшов до адресата (не побудовано жодного логічного каналу з множини L_{ij}), або число спроб перевищило допустиме значення, або виклик дійшов до адресата і встановлено ІВ, але без належної якості обслуговування ($t_{ib} > t_{don}$).

Оцінка ймовірності не встановлення ІВ між СП при с втрачених фізичних каналів на множині всіх L_{ij} визначається у вигляді:

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

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

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

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

Ймовірності $p(\alpha_i = 1)$, $i = \overline{1, d}$ задані під час розв'язання задачі розподілу потоків.

Остаточна оцінка ймовірності не встановлення з'єднання між парою (i, j) набуде вигляду:

$$M\xi(c) = \sum_{c=c_{\min}}^{c_{\max}} \frac{C_d^c}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} p(L_{ij}^k | \xi(x|c) = 1), \quad (4)$$

Таким чином, вираз (4) повністю відображає імовірнісний підхід до встановлення ІВ в інтернет речей з топологією mesh.

При оцінці ймовірнісно-часових характеристик доставки даних застосовують математичний апарат систем масового обслуговування (СМО).

Особливості застосування теорії СМО до моделювання обчислювальних мереж вимагають необхідності враховувати різні види взаємодії окремих СМО, якими моделюються

вузли мережі [13, 14, 15]. Основний вид взаємодії вузлів - послідовне поетапне. В разі встановленого з'єднання - це ланцюжок СП. На рис. 3 приведено загальноприйняте графічне позначення СМО [15].

СМО задається наступними параметрами: $A(t)$ - функцією розподілу інтервалу часу між надходженнями заявок, $0 \leq t$; $B(t)$ - функцією розподілу часу обслуговування заявок; K - кількістю каналів обслуговування, $K \geq 1$; L - довжиною черги, $0 \leq L \leq \infty$.

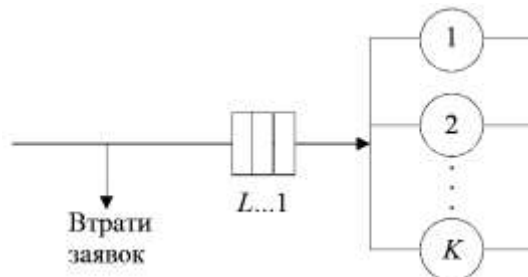


Рисунок 3 - Система масового обслуговування

Характеристики, які оцінюються за допомогою СМО: P_n - ймовірність втрати заявки; $T_{оч}$ - середня тривалість очікування; L - середня кількість заявок в черзі; M - середня кількість заявок в СМО. В теорії СМО для оцінки продуктивності застосовується апарат перетворення Лапласа-Стільтєса (ПЛС). Перетворенням Лапласа-Стільтєса випадкової величини x функції розподілу $B(x)$ називається функція $\beta(s)$, яка визначається наступним чином

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

де $s \geq 0$ - параметр ПЛС.

Якщо x - неперервна випадкова величина, то ПЛС

$$\beta(s) = \int_0^{\infty} e^{-sx} B(x) d(x), \quad (5)$$

Для оцінки ймовірнісно-часових характеристик використовуються відомі властивості ПЛС:

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

2. Якщо B_k є k -й момент випадкової величини відносно початку координат, то

$$B_k = (-1)^k \frac{d^k \beta(s)}{ds^k} \Big|_{s=0} \quad \text{тобто} \quad \text{моменти} \quad \text{випадкової} \quad \text{величини} \quad \text{визначаються}$$

диференціюванням в нулі (при $s = 0$) відповідне число раз перетворення Лапласа-Стільтєса функції розподілу цієї величини. Перший центральний момент визначає математичне очікування випадкової величини,

$$\bar{t} = \beta = \frac{d\beta(s)}{ds}, \quad (6)$$

а другий центральний момент потрібен для знаходження дисперсії випадкової величини

$$\sigma^2 = B_2 - B_1^2 = \frac{d^2 \beta(s)}{ds^2} \Big|_{s=0} - \left[\frac{d\beta(s)}{ds} \Big|_{s=0} \right]^2. \quad (7)$$

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

4. Величина $e^{-sx}B(x_i)$ – є ймовірність складної події, що складається в тому, що випадкова величина не перевищить значення x_i (співмножник $B(x_i)$), а крім того, за час $[0, x_i]$ не відбудеться жодної «катастрофи» (співмножник e^{-sx}). Параметр s розглядається як інтенсивність «катастроф». Інтегрування по всьому діапазону дає $\int_0^{\infty} e^{-sx}dB(x) = \beta(s)$.

Таким чином, імовірнісний сенс перетворення Лапласа - Стілтєса при оцінці t_{no} полягає в тому, що вона визначає ймовірність того, що за час t_{don} будуть передані всі дані.

Розподіл часу передачі даних в інтернет речей описується в термінах перетворення Лапласа-Стілтєса (ПЛС) [4]. В інтернет речей одночасно передаються між різними її елементами K незалежних пуасонівських потоків даних різних класів інтенсивності λ_k , $k=1,...,K$ і обслуговуються за довільним законом, тобто кожний сегмент маршруту є СМО типу $M|G|1$.

Для системи $M|G|1$ відомо рівняння Поллачіка-Хинчина для перетворення Лапласа-Стілтєса (ПЛС) функції розподілу часу очікування $W(s)$

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

де ρ - коефіцієнт завантаження каналу; λ - інтенсивність надходження пакетів в канал; $\beta(s)$ - ПЛС часу обробки пакета на СП. Для обчислення $W(s)$ необхідно знайти ПЛС функції розподілу часу обробки пакета $\beta(s)$. Для випадкової величини t - часу обробки пакету з експоненціальною функцією розподілу

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

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

Перетворення Лапласа-Стілтєса

$$\beta(s) = \frac{\mu}{(\mu + s)} = \frac{1}{(1 + s \cdot t)}.$$

Для випадкової величини t з рівномірною функцією розподілу

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

Перетворення Лапласа-Стілтєса

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

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

$$\beta_k(t) = \prod_{d=1}^N W_d(t) \beta_d(t), \quad (8)$$

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, даний розподіл буде функцією від векторів інтенсивностей надходження і обслуговування пакетів $\beta_k(t) = f(\lambda_k, \mu_k)$.

Метод дає розподіл часу перебування даних k -го класу в мережі інтернет речей, при заданому векторі ймовірностей виникнення помилок на елементах маршруту для всіх пар взаємодіючих СП. ПЛС дозволяє при обмеженнях t_{don} на час t_{no} деякого маршруту визначити

можливе навантаження на цей маршрут і здійснити вибір відповідного алгоритму самоорганізації мережі.

Висновки. Показано, що проектування систем інтернет речей пов'язане з низкою задач, які вимагають моделювання процесів інформаційної взаємодії, що дозволяє при прогнозованому трафіку будувати оптимальні режими функціонування подібних систем.

Запропонована імовірнісна модель встановлення інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей з топологією mesh. Модель дозволяє оцінити абсолютні та ймовірні характеристики інформаційної взаємодії. У моделі враховані умови, відповідні реальному процесу інформаційної взаємодії - наявність непрацездатних каналів і точок доступу, обмежена кількість повторних спроб встановлення з'єднань, наявність альтернативних маршрутів.

Для оцінки часу передачі даних запропоновано застосувати апарат перетворення Лапласа-Стілтєса. Перший центральний момент ПЛС дозволяє визначити середній час передачі даних за встановленою інформаційною взаємодією. Імовірнісний сенс ПЛС дозволяє виконати оцінку ймовірності доставки даних. Метод дає розподіл часу перебування даних k -го класу в мережі інтернет речей, при заданому векторі ймовірностей виникнення помилок на елементах маршруту для всіх пар взаємодіючих СП. ПЛС дозволяє при обмеженнях t_{don} на час t_{no} деякого маршруту визначити можливе навантаження на цей маршрут і здійснити вибір відповідного алгоритму самоорганізації мережі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем : учебник для бакалавров / Б.Я. Советов, С. А. Яковлев. – 7-е изд. – М. : Издательство Юрайт, 2015. – 343 с.
2. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н. А.Олифер - СПб.: Питер, 2017. - 992 с.
3. Росляков, А.В. Сети следующего поколения NGN [Text] : монография / А. В. Росляков - М. : Эко-Трендз, 2008. - 420 с. : ил.
4. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технология. / Ю.И. Рыжиков - СПб: КОРОНА принт, 2015. - 384 с.
5. Алпайдин, Э. Машинное обучение: новый искусственный интеллект / Э. Алпайдин : пер. с англ. – М. : Издательская группа «Точка», Альпина Паблишер, 2017. – 208 с.
6. Риз, Дж. Облачные вычисления. / Дж. Риз: пер. с англ. –СПб.: БХВ-Петербург, 2011. –288 с.:ил.
7. Гольдштейн, Б.С. Сети связи пост-NGN/Б.С.Гольдштейн,А.Е.Кучерявый.–СПб.:БХВ-Петербург,2014.–160с.: ил.
8. Быстрая разработка программ. Принципы, примеры, практика /Роберт Мартин, Джеймс Ньюкирк, Роберт Косс – Изд-во: Диалектика-Вильямс, 2004. – 752 с.
9. Тархов, Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы : справочник / Д.А. Тархов. – Москва : Радио-техника, 2014. – 349 с. : ил.
10. Салмре, Иво Конечный автомат для пользовательского интерфейса. Программирование мобильных устройств на платформе .NET Compact Framework. / Иво Салмре – Изд-во: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 736с.
11. Муляр І.В. Метод предикативної ідентифікації процесів для захисту від прихованих загроз в середовищі хмарних обчислень / С.В. Ленков , В.М. Джулій , О.В. Селюков, І.В. Муляр // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2017. – Вип. № 55. – С. 145-154.
12. Ленков С.В. Динамічні показники оцінки рівня функціональної безпеки інформаційної системи / С.В. Ленков , В.М. Джулій , І.В. Муляр // Сучасна спеціальна техніка. Науково практичний журнал. - ДНДІ МВС України, 2016. - Вип. №2(45). - С.59-67
13. Гибкая разработка программ на Java и C++. Принципы, паттерны и методики. /Роберт С. Мартин, Джеймс Ньюкирк, Роберт Косс – Изд-во: Диалектика-Вильямс, 2016. – 704 с.
14. Кутузов, О.И. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик [Текст] : монография / О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова - СПб. : ГУАП, 2015. - 381 с.

15. Тюрликов, А.М. Методы случайного множественного доступа [Текст] : монография / А. М. Тюрликов - Санкт-Петербург : ГУАП, 2014. - 299 с. : ил.

REFERENCES:

1. Sovetov, B. Ya. and Yakovlev, S.A. (2015), "Modelirovanie sistem : uchebnik dlya bakalavrov" [System modeling: a textbook for bachelors], 7-e izd. M. : Izdatelstvo Yurayt, 343p.
2. Olifer, V.G. and Olifer, N.A. (2017), "Kompyuternyye seti. Printsipy, tehnologii, protokoly" [Computer networks. Principles, technologies, protocols], SPb.: Piter, 992p.
3. Roslyakov, A. V. (2008), "Seti sleduyushchego pokoleniya NGN"[Next Generation NGN Networks], [Text] : monografiya, M. : Eko-Trendz, 420p. : il.
4. Ryizhikov, Yu.I. (2015), "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i tehnologiya." [Imitation modeling. Theory and technology], SPb: KORONA print, 384p.
5. Alpaydin, E. (2017), "Mashinnoe obucheniye: novyy iskusstvennyy intellekt"[Machine Learning: New Artificial Intelligence], per. s angl. – M. : Izdatelskaya gruppa «Tochka», Alpina Publisher, 208 p.
6. Riz, Dzh. (2011), "Oblachnyye vychisleniya"[Cloud computing], per. s angl., SPb.: BHV-Peterburg, 288p.: il.
7. Goldshteyn, B.S. and Kucheryavy, A.E. (2014), "Seti svyazi post-NGN"[Post-NGN communication networks], SPb.:BHV-Peterburg, 160p.: il.
8. Martin, Robert, Nyukirk, Dzheyms and Koss, Robert (2004), "Byistraya razrabotka programm. Printsipy, primery, praktika"[Rapid development of programs. Principles, examples, practice], Izd-vo: Dialektika-Vilyams, 752 p.
9. Tarhov, D.A. (2014), "Neyrosetevyye modeli i algoritmy : spravochnik"[Neural network models and algorithms: a reference book], Moskva : Radio- tehnika, 349p. : il.
10. Salmre, Ivo (2006), "Konechnyy avtomat dlya polzovatel'skogo interfeysa. Programirovaniye mobilnykh ustroystv na platforme .NET Compact Framework" [A state machine for the user interface. Programming mobile devices on the .NET Compact Framework], Izd-vo: Izdatelskiy dom "Vilyams", 736p.
11. Muliar I.V. Metod predykativnoy identifikatsii protsesiv dlia zakhystu vid prykhovanykh zahroz v seredovyshchi khmarnykh obchyslen / S.V. Lienkov , V.M. Dzhulii , O.V. Seliukov, I.V. Muliar // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU, 2017. – Vyp. № 55. – С. 145-154.
12. 6. Lenkov S.V. Dynamichni pokaznyky otsinky rivnia funktsionalnoi bezpeky informatsiinoi systemy / S.V. Lienkov, V.M. Dzhulii , I.V. Muliar // Suchasna spetsialna tekhnika. Naukovo praktychnyi zhurnal. - DNDI MVS Ukrainy, 2016. - Vyp. №2(45). - С.59-67.
13. Martin, Robert, Nyukirk, Dzheyms and Koss, Robert (2016), "Gibkaya razrabotka programm na Java i C . Printsipy, patterny i metodiki." [Flexible development of Java and C ++ programs. Principles, Patterns and Techniques], Izd-vo: Dialektika-Vilyams, 704p.
14. Kutuzov, OI. and Tatarnikova, T. M. (2014), "Infokommunikatsionnyye seti. Modelirovaniye i otsenka veroyatnostno-vremennykh harakteristik"[Infocommunication networks. Modeling and evaluation of probability-time characteristics], [Tekst] : monografiya, SPb. : GUAP, 381p..
15. Tyurlikov, A.M. (2014), "Metody sluchaynogo mnozhestvennogo dostupa"[Random Multiple Access Methods], [Tekst] : monografiya , Sankt-Peterburg : GUAP, 299p. : il.

к.т.н., доц. Муляр И.В., д.т.н., с.н.с. Селюков А.В., к.т.н., доц. Джулий В.Н., Кизюн Б.Н.
МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИНФОРМАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

В статье предложен подход к определению оценки вероятностно-временных характеристик информационного взаимодействия в сети интернет вещей.

Проектирование систем интернет вещей (IoT) связано с рядом задач, которые требуют моделирования процессов информационного взаимодействия, что позволит при прогнозируемом трафике строить оптимальные режимы функционирования подобных систем. Основная идея интернет вещей заключается в организации взаимодействия различных предметов в окружающей среде, передачи информации, генерируемой этими вещами и предоставления бесперебойного соединения. С учетом новизны предметной области, фундаментальных характеристик и сложности организации IoT, основным средством исследования на ранних

этапах проектирования интернет вещей моделирования и соответствующие алгоритмы, определяющие актуальность работы.

Предложенная вероятностная модель установления информационного взаимодействия в сети интернет вещей с топологией mesh, основанная на мультиагентном подходе, построенная на базе фундаментальных характеристик технологии интернет вещей. Модель позволяет оценить абсолютные и вероятностные характеристики информационного взаимодействия. В модели учтены условия, соответствующие реальному процессу информационного взаимодействия - наличие неисправных каналов и точек доступа, ограниченное количество повторных попыток установления соединений, наличие альтернативных маршрутов.

Для оценки времени передачи данных предложено применить аппарат преобразования Лапласа-Стилтьеса. Первый центральный момент ПЛС позволяет определить среднее время передачи данных по установленной информационным взаимодействием. Вероятностный смысл ПЛС позволяет выполнить оценку вероятности доставки данных. Метод предоставляет распределение времени пребывания данных k -го класса в сети интернет вещей, при заданном векторе вероятностей возникновения ошибок на элементах маршрута для всех пар взаимодействующих сенсорных устройств. ПЛС позволяет при ограничениях на время некоторого маршрута определить возможную нагрузку на этот маршрут и осуществить выбор соответствующего алгоритма самоорганизации сети.

Ключевые слова: интернет вещей, облачные вычисления, вероятностная модель, туманные вычисления, сенсорное устройство, информационное взаимодействие.

Ph.D. Mulyar I.V., prof. Selyukov A.V., Ph.D. Dzhulij V.M., Kizyun B.N.
OF MATERIAL-TIME CHARACTERISTICS EVALUATION MODEL
OF INFORMATION RELATIONSHIP IN THE NETWORK OF THE INTERNET THINGS

The article proposes an approach to the estimation of probabilistic-time characteristics of the information interaction in the Internet of things.

Designing Internet Systems (IoT) is associated with a number of tasks that require simulation of information interaction processes, which will allow optimal modes of operation of similar systems to be created in predicted traffic.

The main idea of the Internet things is to organize the interaction of various objects in the environment, the transfer of information generated by these things and provide uninterrupted connection. Taking into account the novelty of the subject area, the fundamental characteristics and complexity of the organization IoT, the main means of research in the early stages of designing Internet things is the simulation and the corresponding algorithms that determine the relevance of the work.

The probabilistic model of establishing information interaction in the Internet of things based on the mesh topology based on the multiagent approach is proposed, taking into account the fundamental characteristics of Internet technology. The model allows estimating the absolute and probabilistic characteristics of the information interaction. The model takes into account the conditions that correspond to the actual process of information interaction - the presence of inoperable channels and access points, limited number of repeated attempts to establish connections, the availability of alternative routes.

To evaluate the time of data transmission, it is proposed to use the Laplace-Stilltiess transformer. The first central point of the PLC allows you to determine the average data transmission time for the established information interaction. The probabilistic meaning of the PLC allows estimating the probability of data delivery. The method provides the distribution of the time of stay of the k -th class data in the Internet of things, with a given vector of probability of occurrence of errors on the route elements for all pairs of interacting sensory devices. PLC allows with restrictions t_{dop} per hour t_{pd} some route to determine the possible load on this route and to select the appropriate algorithm of the network self-organization.

Keywords: internet things, cloud computing, probabilistic model, fuzzy calculations, touch device, information interaction.