

DOI: 10.18372/2310-5461.63.18947

УДК 004.77.(045)

С. С. Чумаченко,Національний авіаційний університет, Київ
orcid.org/ 0009-0003-8755-5286
e-mail: serjek2@gmail.com;**Б. С. Чумаченко,**Національний авіаційний університет, Київ
orcid.org/ 0000-0002-0354-2206
e-mail: body21033@gmail.com;**М. М. Малоед,** канд. техн. наукНаціональний авіаційний університет, Київ
orcid.org/ 0000-0001-5468-9729
e-mail: maryna.maloied@npp.nau.edu.ua;**Р. С. Одарченко,** д-р. техн. наук, проф.Національний авіаційний університет, Київ
orcid.org/ 0000-0002-7130-1375
e-mail: roman.odarchenko@npp.nau.edu.ua;**А. В. Пазюк,** д-р. юрид. наук, проф.Національний авіаційний університет, Київ
orcid.org/ 0000-0002-1622-1671
e-mail: inet.media.law@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ M2M ТРАФІКУ СУЧАСНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗК

Вступ

Розвиток мереж зв'язку призводить до розширення їх можливостей у передачі трафіку. У зв'язку зі збільшенням обсягів оброблених та переданих даних, зокрема трафіку передавання медіафайлів, спеціалісти з обробки даних прагнуть до підвищення якості зображень шляхом постійного вдосконалення засобів і стандартів мультимедійного представлення. Важливо зазначити, що трафік передавання медіафайлів, що генерується користувачами, характеризується стабільністю та передбачуваністю, оскільки передача даних здійснюється переважно у відповідь на запити користувачів.

Проте, окрім трафіку передачі медіафайлів, сучасні мережі стикаються зі зростаючим потоком даних між пристроями, переважно в рамках концепції Інтернету речей. Незважаючи на те, що частка цього типу трафіку значно менша, ніж у трафіку передачі медіафайлів, IoT-трафік є найменш дослідженим аспектом мережевого трафіку і зазвичай характеризується меншою передбачуваністю. Такі дані зазвичай генеруються автоматично пристроями без прямого впливу користувачів, що ускладнює стабільність та прогнозування параметрів передачі інформації.

Особливість M2M трафіку полягає в тому, що він генерується значною кількістю пристроїв, яка

потенційно може бути набагато більшою, ніж кількість звичайних користувачів. Цей тип трафіку відрізняється від інших пріоритетних аспектів через те, що пристрої, які його генерують, працюють на основі стійких алгоритмів і не приділяють особливої уваги на інші фактори. Це може призвести до збільшення навантаження на мережу та створення додаткових вразливостей.

У контексті цього дослідження, значна увага приділяється розробці нових технологій для ефективного управління трафіком M2M. Наприклад, стандарти мобільних мереж LTE та 5G включають механізми обслуговування та управління M2M трафіком. Один із таких механізмів – це «вивантаження», яка передбачає обробку M2M трафіку в інших типах мереж. Важливо врахувати характеристики цього трафіку для ефективного реалізації обслуговування.

У статті наведено результати аналізу трафіку M2M з використанням моделі, запропонованої 3GPP (3rd Generation Partnership Project), яка була ретельно проаналізована та вдосконалена з метою покращення її моделювання. Аналітичні описи моделі та результати імітаційного моделювання дозволяють розуміти вплив M2M трафіку на якість обслуговування в мережах зв'язку.

Отримані результати можуть бути використані як для моделювання трафіку M2M пристроїв, так і для визначення їх параметрів. Наприклад, вони

можуть бути використані для розробки алгоритмів управління такими пристроями під час перевантажень мережі.

Аналіз досліджень і публікацій

Дослідження з розвитку Інтернету речей відіграють важливу роль у науковій літературі, спрямованій на прогнозування зростання автоматизованих пристроїв, що підключені до мережі зв'язку. Наприклад, одне з досліджень [1] оцінює потребу у сенсорних пристроях у різних сферах діяльності в Україні і приходять до висновку, що трафік, що генерується цими пристроями, буде значною частиною загального трафіку мереж зв'язку. В інших дослідженнях, для прикладу в [2] прогнозується зростання кількості пристроїв Інтернету речей до кількох трильйонів.

В дослідженні [3] була запропонована модель трафіку M2M, в якій розглядаються три типи трафіку:

- квазідетермінований (типовий для систем моніторингу і диспетчерського управління);
- опосередкований (результат змін контрольованих процесів);
- технологічний (визначений алгоритмом надання послуг).

Застосовуючи методологію, описану у роботі [4], були ретельно проаналізовані характеристики кількох різновидів трафіку, зокрема опосередкованого трафіку, що може призводити до перевантаження мережі, наприклад, у випадку масових викликів. Інші дослідження [5, 6] показали, що у разі масових викликів опосередкований трафік може мати антиперсистентні характеристики [7].

У роботі [8] було проведено вимірювання обсягу трафіку пристроїв M2M в сучасному міському середовищі, що дозволило зробити висновки щодо поширення цих технологій у різних сферах міської інфраструктури. Інші дослідження [9, 10] розглядали особливості трафіку M2M, що генерується мобільними терміналами, системами моніторингу та диспетчерським управлінням, а також вивчали уразливості бездротових сенсорних мереж у разі перевантаження трафіком.

У роботах [11, 12, 13] були розроблені моделі реалізації послуг доповненої реальності в контексті Інтернету речей, а також модель трафіку масових викликів, що виникає у надзвичайних ситуаціях. Крім того, були запропоновані методи зменшення обсягу трафіку та ефективної взаємодії з людьми при використанні сенсорних мереж і мереж управління. У роботі [10] були розроблені моделі трафіку M2M як для звичайних умов, так і для стану «масових викликів», коли трафік концентрується протягом відносно короткого часового інтервалу.

Згадані публікації присвячені різним аспектам розвитку Інтернету речей та моделювання M2M трафіку, включаючи моделювання екстремального трафіку «масових викликів» [14]. Проте для дослідження функціонування мереж зв'язку при обслуговуванні агрегованого трафіку рекомендується мати відповідну модель, яка враховує особливості трафіку, генерованого людиною та трафіку M2M, з урахуванням можливої концентрації трафіку M2M. У даній роботі використовуються моделі, запропоновані в [15, 16], на основі яких розробляється модель агрегованого трафіку та проводиться аналіз впливу концентрації трафіку M2M на якість обслуговування.

Метою даного дослідження є аналіз відомих моделей трафіку пристроїв M2M та розробка на їх основі моделі, яка буде використовуватися для аналізу впливу трафіку M2M на функціонування мереж зв'язку, а також для вибору параметрів пристроїв і ресурсів мережі.

Виклад основного матеріалу

Аналіз характеристик M2M трафіку

Розвиток концепції Інтернету речей проявляється у збільшенні кількості підключень пристроїв M2M до мереж зв'язку та в зростаючому обсязі цього типу трафіку. Специфіка трафіку M2M визначається призначенням пристроїв, що його генерують, їх кількістю та кількісними відношеннями між пристроями різного призначення. З огляду на різноманітність цільових завдань пристроїв M2M, характеристики трафіку в міських та сільських регіонах наразі не можуть бути достатньо точно описані, щоб надати рекомендації для всіх можливих випадків обслуговування.

Трафік M2M в значній мірі визначає характеристики якості обслуговування в мережах 5G. Однак результати проведених досліджень дозволяють припускати наявність певних особливостей цього трафіку, таких як масовий шторм повідомлень та тривалі серії повторних штормів. Ці особливості можуть призводити до значного перевантаження ліній зв'язку, що, в свою чергу, може призвести до погіршення якості обслуговування трафіку.

Для вирішення цих проблем при визначенні параметрів мереж зв'язку, проектуванні та експлуатації необхідно враховувати вищезазначені особливості.

Сучасні мережі M2M зазвичай входять до складу гетерогенних мереж зв'язку, де застосовуються різні технології, включаючи провідні та бездротові. Більшість сучасних мереж цього типу базуються на бездротових технологіях. У цьому контексті можна виділити три основні структури побудови мереж M2M. Перша структура передбачає

використання накладеної мережі, де існуючі бездротові мережі використовуються як мережа доступу. В такому випадку інтерфейс пристрою M2M аналогічний інтерфейсу стандартного абонентського пристрою мережі мобільного зв'язку. Інші варіанти побудови мережі передбачають застосування спеціальних технологій фізичного та каналного рівнів (наприклад, IEEE 802.11, IEEE 802.15.4, LoRaWAN та інші) для організації мережі між пристроями M2M. На рисунку показана організація мережі пристроїв M2M з використанням структури «зірка», де всі пристрої з'єднані з шлюзом (координатором), який може бути підключений через мережу загального використання.

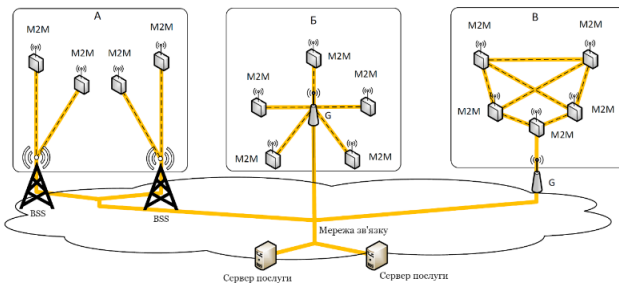


Рис. 1. Основні структури побудови мережі M2M

На рисунку 1. показана організація пристроїв M2M у формі ad hoc мережі, де один або кілька вузлів виконують роль шлюзу і підключені до загальної мережі. Вразливості цих структур до масових викликів трафіку залежать від характеристик мережі доступу, які визначаються її технічними можливостями. Щодо організації ділянок провідного сегмента мережі, ці вразливості подібні.

Постановка задачі

Один з етапів у напрямку вдосконалення методів обслуговування трафіку полягає у побудові моделі трафіку M2M, яка буде відповідати більшості сучасних та можливо перспективних масових застосувань пристроїв цього типу. Важливо зазначити, що в 2011 році організацією 3GPP був опублікований документ 3GPP TR 37.868 [17], де описані підходи до моделювання трафіку M2M в мережі LTE та наведено ряд результатів моделювання.

Цей документ викликав інтерес не стільки своїм конкретним прикладним значенням, скільки запропонованим методом моделювання трафіку. У відміну від більшості існуючих моделей трафіку, які описують його як неперервний у часі стаціонарний випадковий процес, у документі [40] пропонується розгляд кінцевого інтервалу часу, протягом якого трафік генерується всіма доступними пристроями M2M. Очевидно, що метою цієї моделі є опис найбільш «важкого» для мережі випад-

ку, коли протягом відносно короткого часового інтервалу генерується значний обсяг трафіку.

У [17] пропонуються дві моделі трафіку і два часові інтервали для вивчення та аналізу цього явища.

Функція розподілу трафіку на інтервалі задана щільністю його ймовірності $q(\tau)$, а кількість повідомлень протягом певного часу $[\tau_i, \tau_{i+1}]$ визначається як:

$$M_j = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d\tau.$$

Для першої моделі $q(\tau)$ визначається рівномірним розподілом:

$$q(\tau) = \frac{1}{T},$$

де T – ширина інтервалу.

Для другої моделі $q(\tau)$ визначається β -розподіленням:

$$q(\tau) = \frac{\tau^{\alpha-1} (T-\tau)}{T^{\alpha+\beta-1} \text{Beta}(\alpha, \beta)}, \quad \alpha, \beta > 0,$$

де $\text{Beta}(\alpha, \beta)$ – це β -функція.

Форма щільності ймовірності для трафіку зображена на рис. 2.

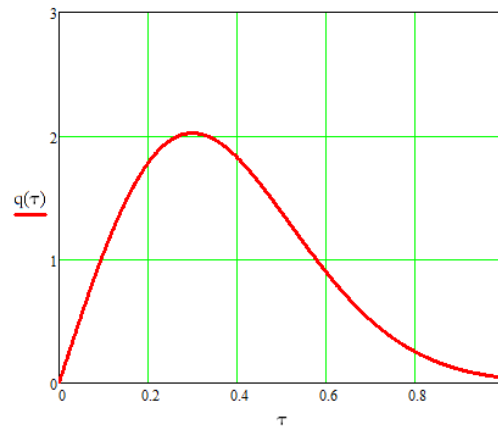


Рис. 2. Функція щільності ймовірності інтервалів між пакетами

Перший тип трафіку відображає роботу незалежних пристроїв M2M, де кожен пристрій передає одне повідомлення в мережу кожні 60 (секунд) у «нормальних» умовах. Ця модель передбачає рівномірно розподілену ймовірність передачі протягом розглянутого часового інтервалу, що відображає сталу та стабільну активність пристроїв.

Другий тип трафіку описує роботу залежних пристроїв M2M, де активація пристроїв відбувається протягом відносно короткого часового інтервалу через певну зовнішню подію. У цьому випад-

дку кожен пристрій передає повідомлення протягом 10 (секунд) після активації, а ймовірність передачі розподілена відповідно до β -розподілу. Ця модель відображає стан підвищеного навантаження в результаті масової активації пристроїв через конкретну подію.

Обидві моделі використовують скінченні інтервали часу, де кожен інтервал можна розглядати як окремих часовий відрізок. Характеристики трафіку визначаються розподілом ймовірностей для цих відрізків, що відображає інтенсивність та часову динаміку передачі повідомлень пристроями M2M. У статті [18] показано, що якщо протягом інтервалу T було здійснено m повідомлень випадковим чином (рівномірно розподілені), то кількість s повідомлень, які потрапили в інтервал $x < X$, може бути визначена за допомогою біноміального розподілу [19].

Цей біноміальний розподіл використовується для моделювання випадкових подій, де є два можливих результати (у цьому випадку, повідомлення може або потрапити в інтервал $x < X$, або ні):

$$P_x(m, s) = C_m^s p_x^s (1 - p_x)^{m-s},$$

де C_m^s – кількість способів вибрати s повідомлень з m ; p_x^s – ймовірність того, що всі s повідомлень потраплять в інтервал $x < X$; $(1 - p_x)^{m-s}$ – ймовірність того, що $m - s$ повідомлень не потраплять в інтервал $x < X$; $p_x = \frac{1}{X}$.

При великому значенні m біноміальний розподіл наближається до розподілу Пуассона [20]:

$$P(s, x) = \frac{(\lambda x)^s}{s!} e^{-\lambda x},$$

де $\lambda = \frac{m}{X}$.

Таким чином, перший тип трафіку, описаний у [17], характеризує трафік, властивості якого при достатньо великому значенні m стають схожими на властивості простішого потоку. Аналогічно до визначення коефіцієнта концентрації навантаження [19], можна ввести коефіцієнт концентрації трафіку M2M. Проблеми концентрації навантаження були розглянуті, наприклад, у [21, 22].

Якщо розглядати інтервал тривалістю 10 (секунд), то коефіцієнт концентрації можна визначити як відношення обсягу трафіку типу II за цей інтервал до обсягу трафіку типу I за той самий інтервал. Очевидно, що це відношення буде рівним:

$$c_s = \frac{v_{II}}{v_I} = \frac{m}{\frac{10}{60}m} = 6.$$

Отже, у другій моделі середня інтенсивність трафіку є більшою в 6 разів порівняно з першою моделлю, оскільки та сама кількість повідомлень створюється за інтервал, який коротший у 6 разів. Крім того, у другій моделі трафік не є стаціонарним, а його інтенсивність змінюється з часом відповідно до β -розподілу. Це означає, що на коротших часових інтервалах коефіцієнт концентрації трафіку буде значно вищим, ніж той, який був описаний у попередніх обговореннях.

Запропоновані моделі можуть бути використані для вивчення впливу трафіку M2M на якість обслуговування, як це відзначено у [23]. Однак цікаво розробити комплексну модель, яка об'єднає властивості першої і другої моделей. Також бажано перейти від обмежених часових інтервалів до неперервної, необмеженої осі часу.

З точки зору прийняття рішень щодо побудови мереж зв'язку, необхідно оцінити вплив агрегованого трафіку на якість обслуговування. Такий комплексний підхід дозволить краще розуміти динаміку та взаємодію різних типів трафіку M2M на протязі тривалого періоду часу, що є важливим для розробки ефективних стратегій управління мережею зв'язку.

Вплив трафіку M2M на якість обслуговування

У випадку другого типу трафіку, перехід до моделі потоку є більш складним, оскільки потрібно врахувати дві складові, які визначають властивості трафіку. Перша складова полягає в процесі, що призводить до виникнення подій, що ініціюють трафік, тоді як друга складова - це процес генерації трафіку елементами мережі відповідно до цих подій.

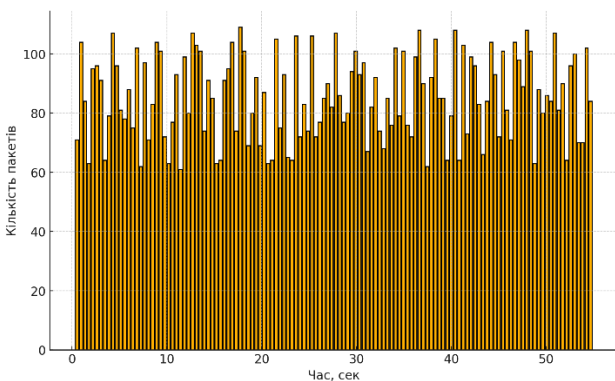
Ця модель фактично є моделлю увімкнено/вимкнено [24], з особливістю в тому, що властивості трафіку, що генерується протягом періоду «увімкнено», визначаються за β -розподілом ймовірностей. У такій моделі щільність ймовірності інтервалу часу між моментами надходження повідомлень буде визначатися як щільність ймовірності інтервалу між повідомленнями, помноженої на щільність ймовірності інтервалу між подіями, що ініціюють масову активацію пристроїв (тип трафіку 2).

Отже, у цій моделі розглядаються взаємозв'язки між процесом виникнення подій, генерацією трафіку відповідно до цих подій та розподі-

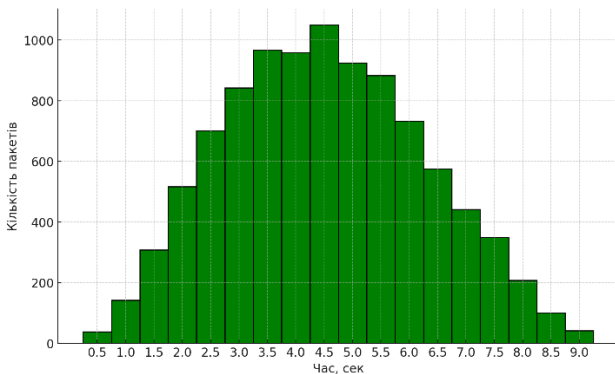
лом часових інтервалів між надходженням повідомлень. Цей підхід дозволяє більш точно моделювати та аналізувати динаміку трафіку M2M у мережі з урахуванням його внутрішніх механізмів та залежностей від подій, що виникають в мережі.

$$f(\tau, \omega) = \begin{cases} \lambda e^{-\frac{1}{\lambda}\tau}, & \omega > T_0 \\ \frac{\omega^{\alpha-1}(T-\omega)}{T^{\alpha+\beta-1}Beta(\alpha, \beta)}, & \omega \leq T_0 \end{cases},$$

де λ – інтенсивність подій, що призводять до масової активації пристроїв M2M; α, β – параметри β -розподілу.



а



б

Рис. 3. Показники імітаційного моделювання трафіку першого і другого типів

Можливо, можна очікувати, що інтенсивність подій, які призводять до масової активації пристроїв M2M, буде значно меншою, ніж інтенсивність трафіку, який ці пристрої генерує протягом інтервалу часу T_0 . Події такого роду можуть бути різного характеру, наприклад, відмови та аварії, масштаби яких настільки великі, що вони впливають на всі пристрої в мережі.

Іншими словами, інтервал між такими подіями буде значно більшим, ніж інтервал T_0 , (тобто $T_0 \ll \frac{1}{\lambda}$, де λ – інтенсивність подій). Можлива реалізація трафіку типів 1 і 2, отримана імітаційним моделюванням у AnyLogic, наведена на рис. 3.

Тепер розглянемо модель агрегованого трафіку з деякими припущеннями. Агрегований потік складається з двох видів потоків:

- потік, що генерується користувачами (H2H);
- потік, що генерується пристроями M2M.

Потік H2H є простим потоком. Потік M2M у «нормальному» режимі також є простим потоком з відносною інтенсивністю $\frac{1}{60}$ (пакетів/с).

Проте в момент часу $\tau = 20$ (секунд) відбувається подія, що призводить до масової активації пристроїв M2M.

У наведеному прикладі кількість пристроїв M2M дорівнює 10000, а навантаження на канал зв'язку, який обслуговує агрегований потік у «нормальному» режимі, становить 0,8 Ерл.

Структура моделі наведена на рис. 4. Такий підхід дозволяє моделювати складну динаміку трафіку в мережі з урахуванням подій, що призводять до зміни інтенсивності трафіку та впливу цього на мережу зв'язку.

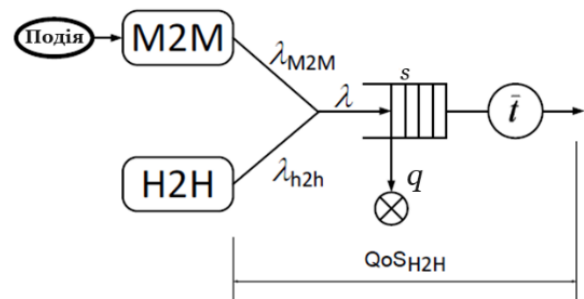
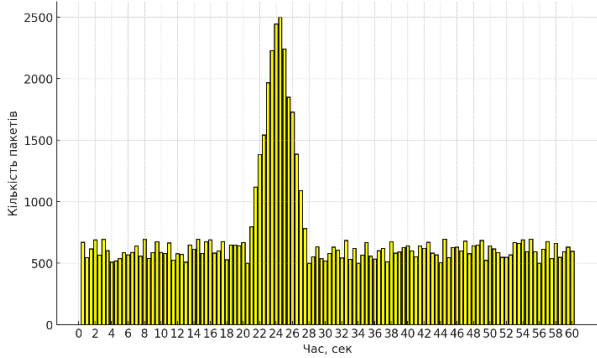


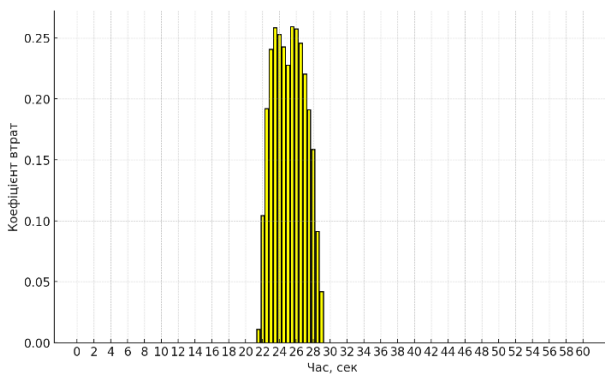
Рис. 4. Модель обслуговування агрегованого трафіку

На рис. 5 показана реалізація трафіку, отримана за допомогою математичного моделювання, разом із зміною коефіцієнта втрат. У даному прикладі частка трафіку пристроїв M2M у «нормальному» режимі становить 10%. Цей рисунок відображає динаміку трафіку в мережі з часом, де видно, як змінюється загальний обсяг трафіку та його характеристики. Крім того, показано, як змінюється коефіцієнт втрат в залежності від введення трафіку пристроїв M2M у «нормальному» режимі.

Згідно з наведеними результатами, при виникненні події, що спричиняє масову активацію пристроїв M2M, коефіцієнт втрат зростає до 0,25.



a

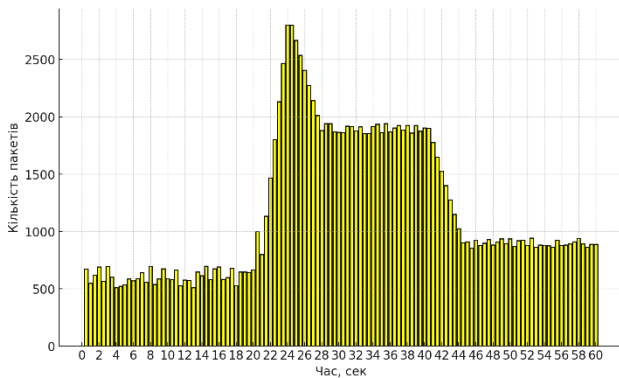


б

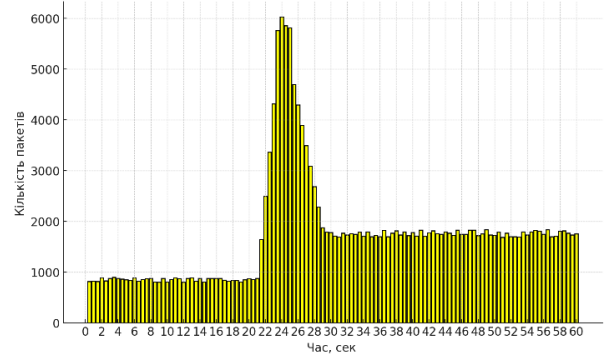
Рис. 5. Реалізація потоку агрегованого трафіку протягом 60 секунд, в межах якого в момент $\tau = 20$ (секунд) відбувається масова активація пристроїв

Це означає, що якість обслуговування тимчасово погіршується протягом періоду активації всіх пристроїв M2M (10 секунд, згідно з моделлю [17]).

Збільшення коефіцієнта втрат пакетів призводить до втрати частини пакетів/повідомлень M2M. У разі використання механізмів гарантованої доставки, втрачені пакети повторно передаються. Наприклад, якщо розглядати цю ситуацію з функцією гарантованої доставки, реакція трафіку на подію може виглядати так, як показано на рис. 6:



a



б

Рис. 6. Реалізація потоку агрегованого трафіку протягом 60 с, з гарантованою доставкою пакетів

Як видно з рис. 6, *a*, при використанні гарантованої доставки пакетів, період підвищеного навантаження значно збільшується через повторні передачі пакетів або очікування. У розглянутій моделі кожен M2M пристрій виконує передачу одного пакета. Проте у реальній мережі для передачі повідомлення може знадобитися обслуговування серії пакетів. На рис. 6, *б* наведено реалізацію трафіку для моделі, в якій для передачі одного повідомлення потрібна передача від 2 до 5 пакетів.

У всіх розглянутих випадках зміна трафіку обумовлена зайнятістю каналу, що призводить до необхідності повторної передачі або очікування. Ця зміна є тимчасовою і тривалість визначається часом, який потрібно мережі для виконання роботи по доставці/передачі m пакетів/повідомлень.

Розглянута вище модель застосовна у випадку використання провідного каналу, коли у вузлі зв'язку є вхідний буфер обмеженого розміру, в якому застосовується комбіноване правило обслуговування. Моделі зі схожими спробами описані у статті [25].

У випадку бездротового каналу застосовуються різні протоколи управління доступом до середовища в залежності від використаної технології. В більшості випадків ці протоколи також призводять до затримок або повторної передачі пакета у разі колізії або невдачі доступу до каналу, як показано на рис. 7.

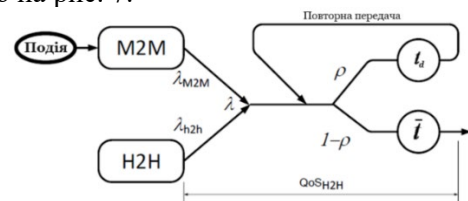


Рис. 7. Модель обслуговування агрегованого трафіку під час використання загального середовища розповсюдження сигналу

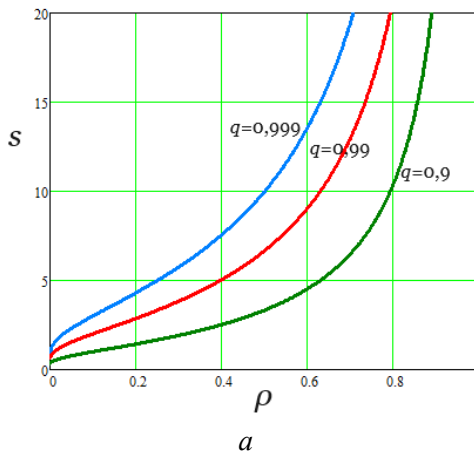
Щоб оцінити ймовірність вільного стану каналу у випадку пуасонівського потоку запитів протягом досить короткого інтервалу часу, можна скористатися формулою для ймовірності того, що канал не буде зайнятий протягом цього часу, при умові сталої інтенсивності потоку. Ця ймовірність може бути оцінена за допомогою формули:

$$p_{sv} = 1 - \rho = 1 - E(\rho_v, 1), \quad (1)$$

де ρ – використання каналу, яке може бути оцінено за допомогою першої формули Ерланга [17] як

$$\rho = E(a, 1) = \frac{\rho_v}{1 + \rho_v}.$$

Ймовірність доставки пакета з урахуванням багаторазової передачі можна записати як:



$$p_d = 1 - p_0^s = 1 - \rho^s = 1 - \left(\frac{\rho_v}{1 + \rho_v} \right)^s, \quad (2)$$

де s – кількість спроб передачі пакета; p_0 – ймовірність відмови (у цьому випадку ймовірність зайнятості каналу).

З (1) можна отримати оцінку для s :

$$s = \frac{\ln(1 - p_d)}{\ln \rho} = \frac{\ln(1 - p_d)}{\ln \left(\frac{\rho_v}{1 + \rho_v} \right)}.$$

Діаграма залежності числа спроб передачі від інтенсивності навантаження каналу ρ та ймовірності доставки наведена на рис. 8.

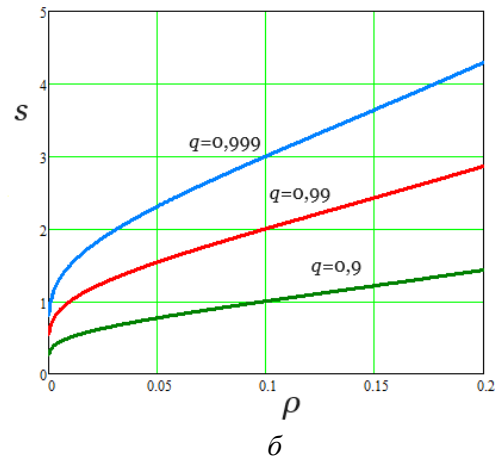


Рис. 8. Залежність s від інтенсивності навантаження та ймовірності доставки

Ймовірність того, що для доставки пакета потрібно s спроб передачі визначається як:

$$p_s = (1 - p_0) p_0^{s-1} = (1 - \rho) \rho^{s-1}.$$

Тоді середня кількість спроб передачі може бути отримана як:

$$s_m = \sum_{s=1}^{\infty} s p_s = \sum_{s=1}^{\infty} s (1 - \rho) \rho^{s-1}.$$

На рис. 9 зображено залежність середньої кількості спроб від інтенсивності навантаження.

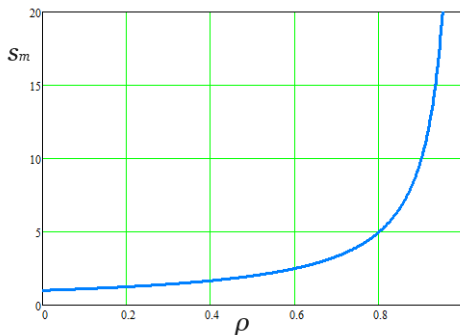


Рис. 9. Залежність середнього значення s_m від інтенсивності навантаження

На рис. 8. та 9. діаграми показують залежність між інтенсивністю навантаження ρ та середньою кількістю спроб передачі s . Ці графіки демонструють, як змінюється кількість спроб при зміні рівня використання каналу.

У зоні високої ймовірності доставки (низького використання каналу) до 0.2 на рис. 8 і 9 кількість спроб передачі є відносно невеликою (до 5), що показує ефективність каналу при низькому навантаженні. Проте, якщо використання каналу зростає, кількість спроб різко збільшується, що вказує на зростання збоїв та інших проблем у передачі даних чи повідомлень через канал.

У випадку, коли спроба передачі може розглядатися як тест стану каналу, використання моделі з рис. 7. та постійної тривалості передачі $t_d = 10$ (секунд), реалізація трафіку показана на рис. 10. Ця реалізація ілюструє, як канал реагує на різні рівні навантаження і як збільшення використання каналу призводить до зростання кількості спроб передачі та, відповідно, до збільшення ймовірності збоїв та втрат даних.

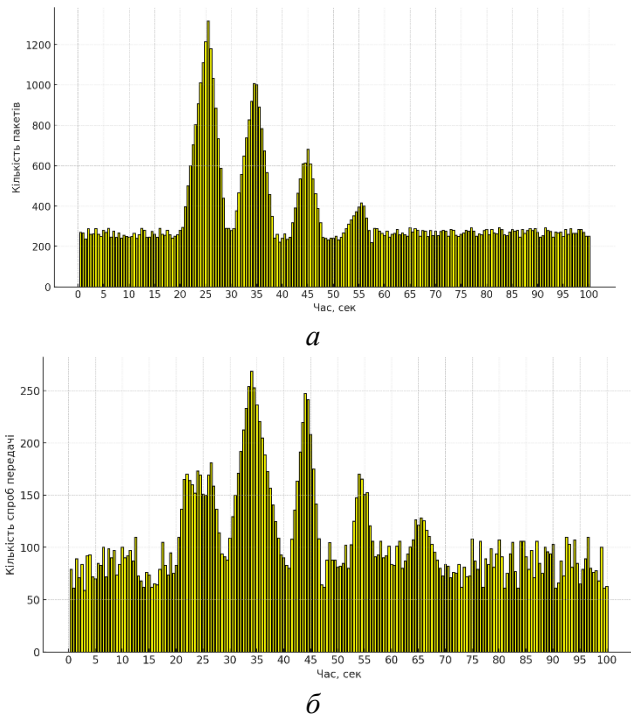


Рис. 10. Реалізація потоку агрегованого трафіку протягом 100 с з гарантованою доставкою пакетів

На рис. 10, *a* зображено процес передачі пакетів, який розпочався у момент часу $t = 20$ (секунд), і повторюється кілька разів з періодом 10 (секунд). Цей процес показує, як канал використовується під час передачі даних, починаючи з моменту активації пристроїв M2M. Періодичність цього процесу демонструє повторюваність передачі даних через канал з певною частотою.

На рис. 10, *б* показано кількість втрачених пакетів у залежності від часу. Ця діаграма відображає тенденцію до збільшення кількості втрачених пакетів під час використання каналу з високим навантаженням. Втрати пакетів можуть статися через збої або інші проблеми, які виникають при великому обсязі передачі даних через канал.

Час доставки пакета від пристрою M2M залежить від обраного параметра затримки t_d та якості обслуговування трафіку. Параметр t_d визначає, скільки часу потрібно для передачі одного пакета, і може впливати на час доставки та загальну продуктивність каналу зв'язку.

$$T = s(\rho)t_d .$$

На рис. 11, *a* показана емпірична щільність ймовірності часу доставки для останнього випадку, де параметр t_d вибирається як випадкова величина з метою уникнення повторних періодів перевантаження шляхом збільшення тривалості інтервалу, протягом якого відбувається повторна передача.

У випадку вибору t_d як випадкової величини з експоненціальним розподілом і середнім значенням 10 (секунд), емпірична щільність ймовірності часу доставки матиме вигляд, зображений на рис. 11, *б*. Ця діаграма відображає розподіл часу доставки пакетів у контексті випадкового вибору t_d з експоненціальним розподілом, де тривалість t_d може змінюватися залежно від цього розподілу.

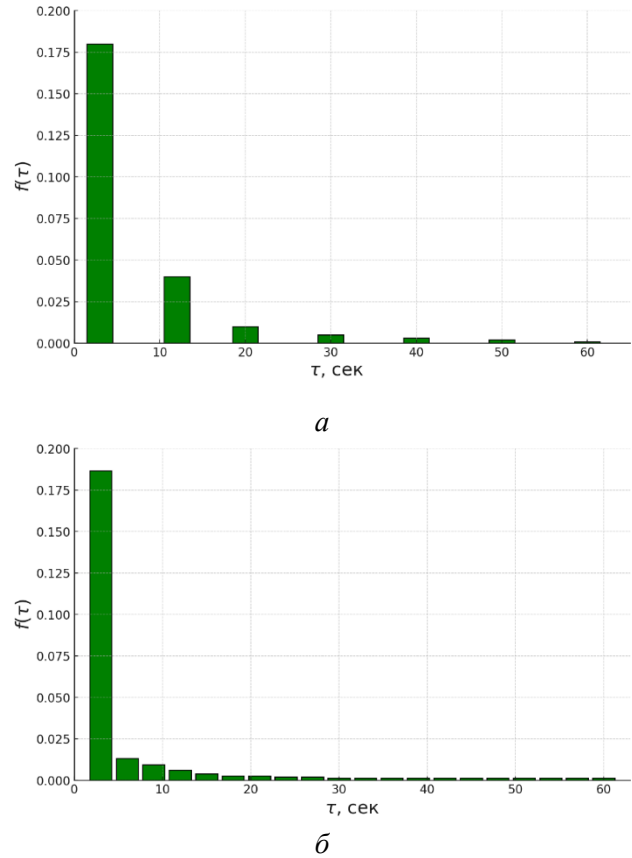


Рис. 11: Емпірична щільність ймовірності часу доставки

У реальній мережі збій у передачі кадру може відбутися на будь-якому з етапів маршруту. З цим урахуванням виразу (2) для ймовірності доставки може бути записаний як:

$$p_d = 1 - p_0^s = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^X (1 - p_0^{(i)}) \right]^s ,$$

де s – це кількість спроб передачі пакета; $p_0^{(i)}$ – це ймовірність відмови на i -му відрізку маршруту; X – кількість відрізків маршруту.

$$s_m = \sum_{s=1}^{\infty} s p_s = \sum_{s=1}^{\infty} s \prod_{i=1}^X (1 - p_0^{(i)}) \left[1 - \prod_{i=1}^X (1 - p_0^{(i)}) \right]^{s-1} . \quad (3)$$

Нехай маршрут складається з трьох компонентів:
 – мережі доступу;
 – ядра мережі;
 – сервера послуг.

Середній час доставки пакета від пристрою M2M з урахуванням (3) може бути визначений як:

$$\bar{T} = s_m t_d.$$

Використання моделі агрегованого трафіку дозволяє більш точно врахувати зміну трафіку під впливом певних подій, наприклад, масової активації пристроїв M2M.

Висновки

У зв'язку зі збільшенням обсягів оброблених та переданих даних, зокрема трафіку передавання медіафайлів, спеціалісти з обробки даних прагнуть до підвищення якості зображень шляхом постійного вдосконалення засобів і стандартів мультимедійного представлення. Трафік передавання медіафайлів, що генерується користувачами, характеризується стабільністю та передбачуваністю, оскільки передача даних здійснюється переважно у відповідь на запити користувачів.

У статті наведено результати аналізу трафіку M2M з використанням моделі, запропонованої 3GPP, яка була ретельно проаналізована та вдосконалена з метою покращення її моделювання. Аналітичні описи моделі та результати імітаційного моделювання дозволяють розуміти вплив M2M трафіку на якість обслуговування в мережах зв'язку.

Отримані результати можуть бути використані як для моделювання трафіку M2M пристроїв, так і для визначення їх параметрів. Наприклад, для розробки алгоритмів управління такими пристроями під час перевантажень мережі.

Таким чином, використання моделі агрегованого трафіку дозволяє більш точно врахувати зміну трафіку під впливом певних подій, наприклад, масової активації пристроїв M2M. Ця модель дозволяє оцінити якість обслуговування пристроїв M2M та фоновому трафіку H2H в умовах змінного навантаження. Оцінка можливих коливань трафіку дозволяє уникнути несподіваних ситуацій у мережі та адекватно реагувати на зміни у її навантаженні.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Khan I., Kim K.-I. A comprehensive review of Internet of Things: Technology stack, middlewares, and fog/edge computing interface. *Sensors*. 2022. V. 22(3). P. 995.
- [2] Lin Y. C., Wang F. Machine learning techniques for recognizing IoT devices. *23rd International Computer Symposium*. 2018. P. 673–680.
- [3] Deng L., Feng Y., Chen D., Rische N. IoTSpot: Identifying the IoT devices using their anonymous network traffic data. *2019 IEEE Military Communications Conference*. 2019. P. 1–6.
- [4] Althoubi A., Alshahrani R., Peyravi H. Delay analysis in IoT sensor networks. *Sensors*. 2021. V. 21(11). P. 3876.
- [5] Salman O., Elhaji I. H., Kayssi A., Chehab A. Data representation for CNN based internet traffic classification: A comparative study. *Multimedia Tools and Applications*. 2021. V. 80, P. 16951–16977.
- [6] Hamad S. A., Zhang W. E., Sheng Q. Z., Nepal S. IoT device identification via network-flow based fingerprinting and learning. *18th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications/13th IEEE International Conference on Big Data Science and Engineering (TrustCom/BigDataSE)*. 2019. P. 103–111.
- [7] Sivanathan A., et al. Characterizing and classifying IoT traffic in smart cities and campuses. *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. 2017. P. 559–564.
- [8] Cheng W., Ding Z., Xu C., Wu X., Xia Y., Mao J. RAFM: A real-time auto detecting and fingerprinting method for IoT devices. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1518(1), 012043.
- [9] Hameed A., Leivadreas, A. IoT traffic multi-classification using network and statistical features in a smart environment. *IEEE 25th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. 2020. P. 1–7.
- [10] Кармазін, В. С., Коваленко, В. А. Особливості розвитку інтернету речей у сучасному світі. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2019. № 2. С. 15–23.
- [11] Bai L., Yao L., Kanhere S. S., Wang X., Yang Z. Automatic device classification from network traffic streams of Internet of Things. In *2018 IEEE 43rd Conference on Local Computer Networks (LCN)*. 2018. P. 1–9.
- [12] Василенко Т. М. Дослідження моделей трафіку Інтернету речей в умовах урбанізованого середовища. *Технічні науки*. 2021. № 6(2). С. 45–54.
- [13] Павленко І. Г. Використання доповненої реальності в освітньому процесі: досвід і перспективи. *Інформаційні технології в освіті*. 2020. № 45. С. 132–141.
- [14] Aksoy A., Gunes M. H. Automated IoT device identification using network traffic. *2019 IEEE International Conference on Communications*. 2019. P. 1–7.
- [15] Yu X., Liu H., Zhao J., Xiong K. ARIoT: Augmented Reality and Internet of Things in healthcare. *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. 2020. P. 1–2.

- [16] Степаненко, О. М. Аналіз концентрації трафіку у бездротових сенсорних мережах. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. № 1(35), С. 112–120.
- [17] 3GPP. Technical Report 37.868: Study on RAN improvements for machine-type communications. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). 2011.
- [18] Бондаренко В. А. Аналіз біноміальних розподілів для моделювання M2M трафіку в мережах. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2022. № 34(2). С. 56–67.
- [19] Smith J. D. Binomial distributions in modeling network traffic. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2015. V. 45(3). P. 134–145.
- [20] Johnson N. L., Kotz S., Kemp A. W. *Univariate Discrete Distributions* (2nd ed.). John Wiley & Sons. 1992. 582 p.
- [21] Nguyen D., Nguyen, H. Traffic concentration models in wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*. 2018. V. 56(12). P. 158–163.
- [22] Bianchi G., Tinnirello I. Kalman-based estimation of channel holding times in IEEE 802.11e EDCA WLANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2003. V. 2(2). P. 296–305.
- [23] Brown T. X., Mohan S., Frolik J. Modeling M2M traffic for IoT applications. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. V. 3(6). P. 1144–1155.
- [24] Błażewicz J., Chmieliński K., Kubiak W., Węglarz J. *Traffic Modeling and Flow Theory*. European Journal of Operational Research. 1996. V. 90(3). P. 459–474.
- [25] Bianchi G., Fratta L., Oliveri M. (2000). Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2000. V. 30(4). P. 27–38.

**Чумаченко С. С., Чумаченко Б. С., Малосед М. М., Одарченко Р. С., Пазюк А. В.
МОДЕЛЮВАННЯ M2M ТРАФІКУ СУЧАСНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ**

Розвиток мереж зв'язку призводить до розширення їх можливостей у передачі трафіку. У зв'язку зі збільшенням обсягів оброблених та переданих даних, зокрема трафіку передавання медіафайлів, спеціалісти з обробки даних прагнуть до підвищення якості зображень шляхом постійного вдосконалення засобів і стандартів мультимедійного представлення. Важливо зазначити, що трафік передавання медіафайлів, що генерується користувачами, характеризується стабільністю та передбачуваністю, оскільки передача даних здійснюється переважно у відповідь на запити користувачів. Проте, окрім трафіку передачі медіафайлів, сучасні мережі стикаються зі зростаючим потоком даних між пристроями, переважно в рамках концепції Інтернету речей. Особливість M2M трафіку полягає в тому, що він генерується значною кількістю пристроїв, яка потенційно може бути набагато більшою, ніж кількість звичайних користувачів. Цей тип трафіку відрізняється від інших пріоритетних аспектів через те, що пристрої, які його генерують, працюють на основі стійких алгоритмів і не приділяють особливої уваги на інші фактори. Це може призвести до збільшення навантаження на мережу та створення додаткових вразливостей. У контексті цього дослідження, значна увага приділяється розробці нових технологій для ефективного управління трафіком M2M. Наприклад, стандарти мобільних мереж LTE та 5G включають механізми обслуговування та управління M2M трафіком.

У статті наведено результати аналізу трафіку M2M з використанням моделі, запропонованої 3GPP, яка була ретельно проаналізована та вдосконалена з метою покращення її моделювання. Аналітичні описи моделі та результати імітаційного моделювання дозволяють розуміти вплив M2M трафіку на якість обслуговування в мережах зв'язку. Отримані результати можуть бути використані як для моделювання трафіку M2M пристроїв, так і для визначення їх параметрів. Наприклад, вони можуть бути використані для розробки алгоритмів управління такими пристроями під час перевантажень мережі.

Ключові слова: Інтернет речей, 5 G, M2M трафік, мережі зв'язку, модель агрегованого трафіку, інтенсивність навантаження, ймовірність збоїв, ймовірність доставки.

**Chumachenko S., Chumachenko B., Maloied M., Odarchenko R., Paziuk A.
MODELING OF M2M TRAFFIC OF MODERN COMMUNICATION NETWORKS**

The development of communication networks leads to the expansion of their capabilities in traffic transmission. In connection with the increase in the volume of processed and transferred data, in particular the traffic of transferring media files, data processing specialists strive to improve the quality of images by constantly improving the means and standards of multimedia presentation. It is important to note that user-generated media traffic is characterized by stability and predictability, as the data is transferred primarily in response to user requests. However, in addition to media traffic, today's networks face an increasing flow of data between devices, mostly within the concept of the Internet of Things. The peculiarity of M2M traffic is that it is generated by a significant number of devices, which can potentially be much larger than the number of ordinary users. This type of traffic differs from other priority aspects because the devices that generate

it work on the basis of stable algorithms and do not pay much attention to other factors. This can increase network load and create additional vulnerabilities. In the context of this research, considerable attention is paid to the development of new technologies for efficient M2M traffic management. For example, LTE and 5G mobile network standards include mechanisms for servicing and managing M2M traffic.

The paper presents the results of M2M traffic analysis using the model proposed by 3GPP, which has been thoroughly analyzed and refined to improve its simulation. Analytical descriptions of the model and results of simulation modeling allow understanding the impact of M2M traffic on the quality of service in communication networks. The obtained results can be used both for modeling the traffic of M2M devices and for determining their parameters. For example, they can be used to develop algorithms for controlling such devices during network overloads.

Keywords: Internet of Things, 5 G, M2M traffic, communication networks, aggregated traffic model, load intensity, failure probability, delivery probability.

Стаття надійшла до редакції 04.07.2024 р.

Прийнято до друку 11.09.2024 р.