УДК 621.391.6

FOG-МЕРЕЖА З АДАПТИВНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ

Осипчук С.О., Будішевський О.В.
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
E-mail: serg.os@ieee.org; ab@it-services.kiev.ua

FOG-NETWORK ARCHITECTURE WITH AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM

In the report an FOG-network architecture with an Adaptive Control System (ACS) is proposed. It is emphasized that the introduction of Internet of Things (IoT) technologies causes an increase in traffic and fluctuations, and traffic should be processed with minimal delays to make the right decisions based on the content of IoT traffic. Decision-making takes place with the help of ACS.

У доповіді пропонується архітектура FOG-мережі із адаптивною системою управління (АСУ). Підкреслюється, що впровадження технологій інтернету речей (IoT) викликає зростання обсягів трафіку та флуктуацій, при цьому трафік має бути оброблений із мінімальними затримками, щоб прийняти вірні рішення виходячи із змісту трафіку IoT. Прийняття рішень відбувається за допомогою АСУ.

У статті розглянуті світові тенденції розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій – ***мережі FOG*** [1]. У даній роботі, FOG-мережа є інструментом забезпечення функціонування іншої технічної тенденції – Інтернету речей (***IoT***) [2].

З часів розробки технологій обробки великих даних (Big Data) та комп'ютерних мереж з'явилися різноманітні парадигми розподілених комп'ютерних мереж: ***хмара, туман, край*** (***Clouds***, ***FOG***, ***Edge)***. Парадигма ***FOG*** займає *проміжне місце* між Cloud та Edge; в той час як розташована якомога ближче до пристроїв *Edge*, FOG частково має можливості зберігання даних та обчислювальні можливості, які має *Cloud*. Збирання даних з пристроїв IoT та обробка тих даних у мережі FOG дозволяє *уникнути* певної ситуації, *управляти* нею, або *врегулювати* її наслідки якомога швидше.

FOG визначається як *децентралізована* обчислювальна інфраструктура, у якій *дані*, *обчислювальні блоки* та *застосунки* розташовані *між хмарою* та *джерелами даних*; ресурси такої мережі використовуються для *зберігання* та *обробки* даних, із доступом до даних як локально, так і з мережі Інтернет. FOG-и характеризуються близькістю до кінцевих користувачів, об'єднанням локальних ресурсів, зменшенням затримки, та заощадженням ємності магістральної мережі. Будь-який пристрій, що має ресурси обчислення, зберігання та комунікації, може бути вузлом мережі FOG. Приклади таких пристроїв включають промислові контролери, комутатори мережі, маршрутизатори, вбудовані сервери, відеонагляд, тощо.

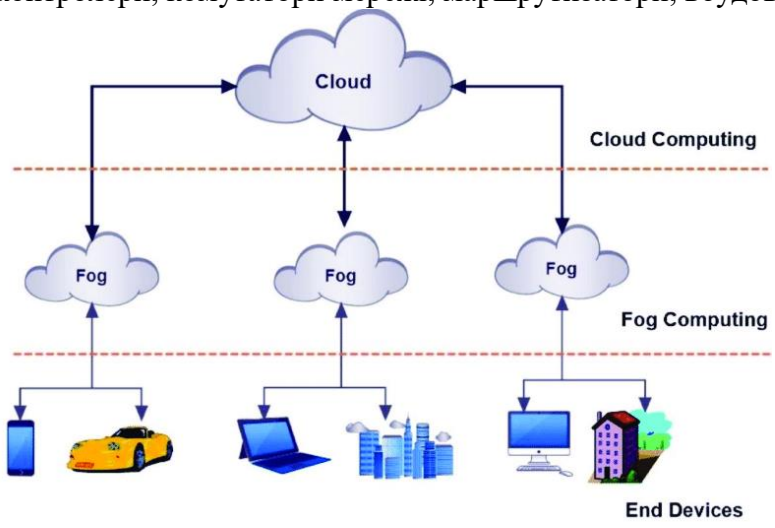

Рис. 1. Місце мережі FOG в телекомунікаційній інфраструктурі. Рівні трьох основних комп'ютерних парадигм: **cloud**, **fog**, **edge**.

Обмежені **ресурси мережі**, **зберігання** та **обчислення** вимагають створення ефективної та оптимальної системи управління такими ресурсами – ***адаптивної системи управління*** (***АСУ***), яка буде управляти

запитами та даними від пристроїв IoT завдяки *розширенню* та *скороченню* ресурсів мережі або *зберіганню* існуючого обсягу обчислювальних ресурсів, яких потребує обробка вхідного трафіку для мінімізації втрат даних, що генеруються в мережі.

Проблема, яку вирішує запропонована схема організації мережі – це зберігання та передавання всіх даних, що генеруються мережею FOG задля мінімізації обсягів втрат даних, у той самий час використовуючи мінімально необхідну та достатню кількість ресурсів мережі FOG. Два моменти стану мережі FOG (еталонний та поточний) будуть мати або такий самий стан ресурсної ємності, або **різницю** між еталонним та поточним станом.

Задачі, що вирішує запропонована мережа FOG із АСУ:

- Управління ресурсами передачі даних у мережі (пропускна здатність мережі), – додавання або деактивація вузлів мережі з метою забезпечення потрібної пропускної здатності мережі FOG.

- Управління ресурсами зберігання мережних даних, – додавання або деактивація вузлів мережі з метою забезпечення потрібної ємності зберігання даних в мережі FOG.

Ціллю доповіді є опис запропонованої моделі і визначення її математичного означення.

Опис моделі. Будь-які ситуації, де задіяна інформаційна система, можуть бути попереджені шляхом **управління**, щоб до них не доводилося згодом адаптуватися, однак передбачити небажані події не завжди вдається. Тому, замість управління, доводиться вдаватися до **регулювання**. У таких випадках **ефективність системи управління** характеризується єдиним показником – **часом реакції** [4]:

$$\tau = t_1 - t_0 \ , \tag{1}$$

де t_0 – момент часу, коли виникла необхідність здійснення дії (момент виникнення проблеми), t_1 – момент вирішення проблеми. Причому t_1 можна також поділити на дві частини: час, коли **приймається рішення** (внутрішній лаг) та час, коли прийняте **рішення реалізується** (зовнішній лаг).

Для системи також може бути визначений деякий **критичний проміжок часу**, протягом якого будь-які рішення проблеми ще **мають сенс**, – $\tau < \tau_{\text{кр}}$.

Реалізація адаптивної системи управління у FOG мережі може допомогти як у **попередженні** певної ситуації, тобто на **фазі управління**, так і в зменшенні часу реакції, тобто на **фазі регулювання** ситуації.

Одним із найважливіших завдань FOG-мережі є **аналіз та реагування на дані**, що збираються в реальному режимі часу, прийняття рішення про реакцію на зібрані дані, та передавання даних чи інформації третім сторонам, що можуть або повинні реагувати на отриману інформацію відповідним чином.

Значні непередбачені зміни обставин, подій, об'єму трафіку в мережі називають **біфуркаціями**. **Біфуркація** — це *суттєва* зміна якісної поведінки динамічної системи за умови *малої* зміни її параметрів.

Аналогічно принципу системи фазового автоматичного підстроювання частоти (**ФАПЧ**), де корекція фази передбачається в реальному режимі часу на певну величину,

$$\Delta f = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \ , \tag{2}$$

інформаційна система може бути спроектована з метою реагування на **біфуркації навантаження в мережі** шляхом збільшення чи зменшення числа залучених об'єктів обчислювальної FOG-інфраструктури [5]:

$$\Delta V = \frac{\partial I_H}{\partial t} . \tag{3}$$

Схема адаптації FOG-мережі для обслуговування інформаційного навантаження на мережу в умовах біфуркацій наведена на рис.2.

В результаті, запропонована **схема адаптації** FOG-мережі для обслуговування інформаційного навантаження на мережу в умовах біфуркацій, забезпечує необхідну **ємність ресурсів** FOG-мережі, що допомагає виконувати поставлені завдання перед FOG-обчислювальною інфраструктурою.

На рис. 3 **наведено архітектуру** системи управління високопродуктивними сенсорними мережами: модель *мережі FOG*, що включає передавання даних від датчиків IoT до мережі FOG і АСУ, обробку інформації в АСУ, і прийняття рішень в АСУ з впливом на *ресурси мережі FOG* та на *об'єкт управління (control object – **CO***).

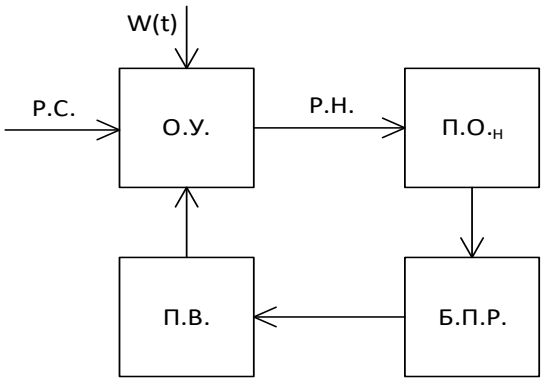

Рис.2. Схема адаптації FOG-мережі для обслуговування інформаційного навантаження на мережу в умовах біфуркацій.

На рис.3.1 позначено:

О.У.	Об'єкт управління
Р.С.	Рівняння стану
W(t)	Навантаження на об'єкт
Р.Н.	Рівняння навантаження
$П.О._{Н}$	Пристрій обслуговування навантаження
Б.П.Р.	Блок прийняття рішення
П.В.	Пристрій виконання

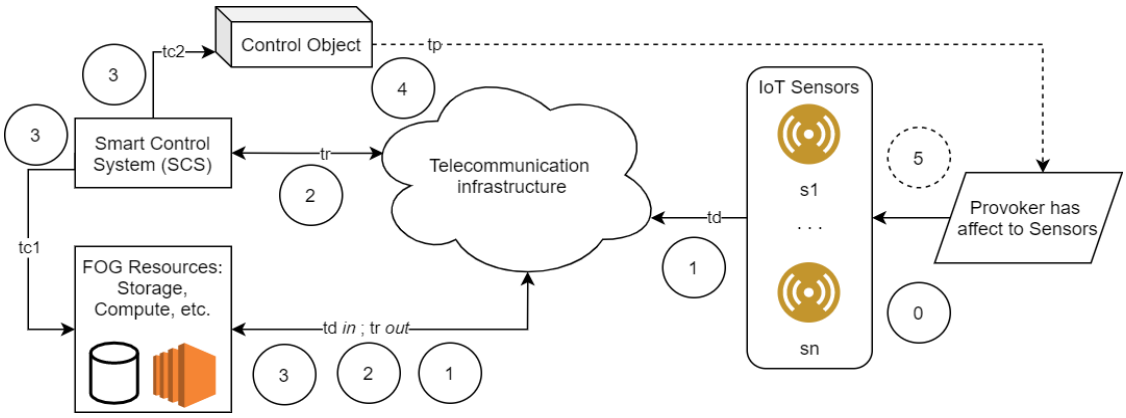

Рис. 3. Схема мережі FOG з АСУ (Smart Control System, SCS).

Розглянемо покроково функціонування запропонованої моделі мережі FOG.

Крок 0. Уявімо, що існує певний збудник, який впливає на датчики IoT.

Крок 1. Вхідний трафік від сенсорних датчиків s***1***,…, s***n***, з певними визначеними характеристиками та параметрами: кількість сенсорів: ***n***; вибірка часу відправки даних від одного сенсора: t***d***; обсяг даних, відправлених від одного сенсора: V***d***.

Інфраструктура телекомунікацій (***TCI***) забезпечує зв'язок між сенсорами та ресурсами FOG, АСУ, об'єктом управління (СО).

V***s*** дані від сенсорних датчиків IoT записуються до *ресурсів зберігання* мережі FOG для подальшого зберігання та обробки.

Ресурси зберігання мережі FOG мають певну обмежену ємність ***S***, що вимірюється у байтах.

Крок 2. АСУ аналізує зібрану інформацію у інтервалах t***r***. АСУ залучає або вивільнює обчислювальні ресурси мережі FOG для надання обчислювальних ресурсів, необхідних для аналізу даних, отриманих від датчиків.

Важливо зазначити, що обчислювальні ресурси мережі FOG мають обмежену

продуктивність ***P***, що вимірюється в інструкціях у секунду (Instructions Per Second, IPS) [3]. На швидкість обчислень в мережі FOG має вплив фактор *складності обчислень* [4]. На *складність обчислень* впливають *тип вхідного трафіку та його характеристики* [5].

Крок 3. АСУ отримує інформацію від мережі FOG та приймає рішення щодо необхідності передачі інструкцій об'єктові управлінні СО в дискретні інтервали: t***c1***, t***c2***. Об'єктом управління можуть бути:

- *Обчислювальні, мережні ресурси або ресурси зберігання мережі FOG, залучити більше* або *вивільнити* ресурси з ціллю обробки потрібного обсягу даних для прийняття рішень АСУ,
- *Інші засоби управління* що можуть реагувати на події або критичні ситуації певним чином (пожежа, військові, медичні, тощо).

Крок 4. Відгук об'єкту управління на отриману інформацію в дискретні проміжки часу t***p***. Наприклад, таким відгуком може бути впровадження дій, спричинених повідомленням найближчих розташувань пожежних бригад, інформуванням публічних служб про підвищення радіаційного фону в регіоні, відповідь на збільшення військових сил супротивника в регіоні та ін.

Крок 5. В результаті виконання дій по відгуку на отриману інформацію, що очікується на кроці 0, але *у наступних циклах, збудник може мати модифікований вплив* на сенсори IoT, які призведуть до *інших рішень, що прийме АСУ*.

Описані кроки 0-5 пропонуються як алгоритм АСУ для мережі FOG.

Математична модель АСУ. **Задача**, яку описує математична модель для інформаційної системи – **управління ресурсами** мережі FOG на підставі змін обсягу обслуговування (**дані**, **трафік**) у телекомунікаційній мережі, з ціллю оперативної реакції на умови, що змінюються, **мінімізації втрат даних** та **своєчасності обслуговування**. На рис. 4 показано схематичне уявлення автопідлаштування виділених ресурсів мережі FOG для своєчасного обслуговування обсягу даних, що змінюється, та трафіку в мережі.

Математична модель роботи АСУ може бути представлена рівняннями 1-го порядку, які описують зміни **обсягу інформації** в мережі: ***I***, та рівняннями **2-го порядку**, які показують **швидкість зміни обсягу інформації** в мережі та інерційність реакції на зміни обсягу даних в мережі: ***V***.

Визначимо деякі поняття для опису математичної моделі.

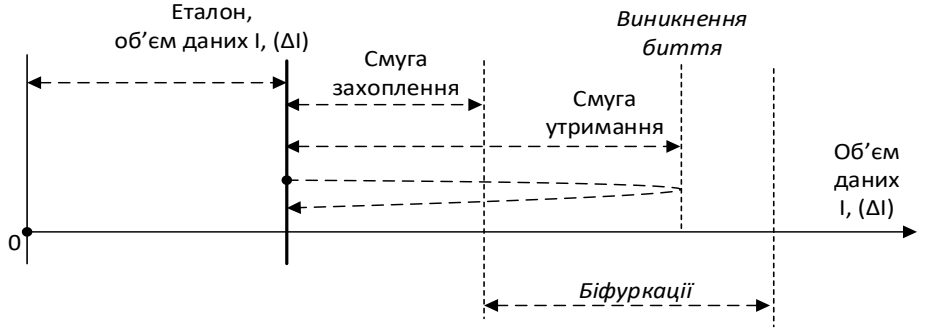

Рис. 4. Схематичне уявлення автопідлаштування виділених ресурсів мережі FOG для своєчасного обслуговування обсягу даних, що змінюється, та трафіку в мережі.

Еталон – деякий **обсяг *I* даних чи трафіку**, відомий та усталений, що потребує обслуговування в мережі FOG. Важливо відзначити, що значення еталону *I* може змінюватись в інформаційній системі як функція часу:

$$\Delta I = f(t); \tag{4}$$

Існує декілька режимів роботи **мережі FOG з АСУ**.

Стаціонарний режим роботи мережі FOG з АСУ. Обсяг даних (трафіку) еталону та даних (трафіку) в мережі рівні, і в результаті – немає необхідності коригувати число ресурсів FOG мережі.

Режим утримання. Обсяг даних (трафіку) еталону та даних (трафіку) в мережі рівні, та

наявні лише незначні зміни обсягу даних (трафіку), у середньому повністю компенсуються діями АСУ. **Смуга утримання** – область начальних відмінностей від еталону, у якій можливий цей режим. Ширина смуги утримання дорівнює кількості ресурсів, що відповідають найбільшому й найменшому обсягу даних (трафіку), що потребують обслуговування.

Режим биття. У даному режиму різність обсягу даних (трафіку) еталону та даних (трафіку) в мережі збільшується з плином часу. Режим биття спостерігається у тих випадках, коли кількість ресурсів мережі FOG, що виділені початково, (еталон) менше, ніж необхідно для обслуговування обсягу даних (трафіку) в мережі, тобто потрібно більше ресурсів, ніж виділено для роботи у **смузі захоплення**.

Режим захоплення – перехідний стан системи, при якому режим биття переходить з плином часу у режим утримання. Під **смугою захоплення** розуміють кількість виділених ресурсів, за яких встановлюється **режим утримання**.

Детектор зміни характеристик трафіку – компонент АСУ, який збирає дані з вузлів мережі FOG про вимоги до обслуговування трафіку FOG з метою їх аналізу та приймає рішення щодо необхідності збільшення чи зменшення ресурсів мережі.

Початкове відхилення значення кількості даних еталону і даних для обробки в мережі:

$$\Omega_{initial} = I_{etalon} - I_{current}; \quad (5)$$

В момент включення АСУ, виникає **необхідність коректування** (додавання або віднімання) кількості ресурсів, що виділені для обробки **нового значення обсягу даних**:

$$I = I_{current} \pm I_{correction}; \quad (6)$$

Миттєве значення кількості даних для обслуговування:

$$I_{correction} = S_{ACS} \cdot I_{ACS}; \quad (7)$$

де $\boldsymbol{S}$ – крутизна характеристики керуючого елементу АСУ, яка визначається відношенням *вимірювання* ресурсів мережі, що виділені для обслуговування даних (трафіку), до *зміни* керуючого обсягу даних (трафіку) в мережі, що викликала його; I_{ACS} – миттєве значення кількості керуючого обсягу даних (трафіку) в мережі.

Значення кількості керуючого обсягу даних (трафіку) в мережі пов'язано із кількістю даних (трафіку) в мережі таким співвідношенням:

$$I_{ACS} = K(p) * I_{current}. \quad (8)$$

Висновки. В роботі показано, що запропонований алгоритм функціонування мережі FOG з АСУ забезпечує:

- Генерацію трафіку з певними характеристиками сенсорами IoT;
- Зберігання та обробку даних в мережі FOG;
- Впровадження АСУ для прийняття рішень щодо управління ресурсами мережі FOG та об'єктами управління, застосовуючи навчальний механізм для АСУ, що базується на потоці трафіку IoT, прийнятих рішеннях та досягнутому ефекті на об'єкти управління;
- Встановлення взаємозв'язків між вхідним трафіком IoT та його впливом на рішення по виконанню дій або їх уникання на об'єкті управління.

Наступним кроком даної роботи є створення *імітаційної моделі* у відповідності із запропонованою схемою мережі FOG з *інтелектуальною системою управління* та дослідження її поведінки при зміні вхідних параметрів.

Запропонована модель може бути використана у вирішенні *різноманітних потреб національного, локального або корпоративного значення* задля ефективного відгуку на зміни в оточуючому середовищі.

Література

1.FOG networking: https://en.wikipedia.org/wiki/Fog_computing
2. Internet of Things: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
3. Instructions per second: https://en.wikipedia.org/wiki/Instructions_per_second
4. Computational complexity: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_complexity
5. Network traffic: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_traffic