

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІИ

УДК 621.391+004.7

МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ МЕРЕЖІ У ВІРТУАЛІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

СУЛИМА С.В.

Розглядається віртуалізація телекомунікаційної мережі. Описується метод динамічного відновлення вузлів з відмовою, який використовує евристичну модель для визначення оптимального місця міграції віртуалізованих функціональних вузлів з фізичного вузла з відмовою. Розглядається проблема вибору місць розташування децентралізованих вузлів управління.

Ключові слова: NFV, виділення ресурсів, відновлення мережі, мобільна мережа.

Key words: NFV, resource allocation, network recovery, mobile network.

1. Вступ

Хмарні обчислення – це нова парадигма, яка пропонує обчислювальні ресурси віртуалізованим способом з безпрецедентним рівнем гнучкості, надійності і масштабованості. У парадигмі хмарних обчислень передбачається, що обчислювальні ресурси пропонуються споживачам як сервіс. Це приводить до встановлення нової моделі обчислень, в якій такі ресурси управляються і виділяються інакше, ніж в традиційних сценаріях. При підключенні до хмарних інфраструктур можна отримати віддалений доступ до колекції віртуальних ресурсів, які включають в себе обробку, пам'ять, зберігання і передачу даних. Обчислювальні ресурси надаються динамічно, і очікується, що їх використання повинне дотримуватися угод про рівень обслуговування (Service Level Agreement – SLA) між провайдером інфраструктури і споживачами [1].

Оператори зв'язку все більше цікавляться віртуалізацією мережі. Деякими потенційними випадками використання в секторі телекомунікацій є простота розгортання вузлів, таких як MME, S/P-GW, масштабування за їх вимогою на основі миттєвого навантаження, а не на основі надмірного виділення ресурсів для пікового навантаження, динамічна реконфігурація топології для уникнення відмов і відновлення і т.д. Це прискорює розгортання мережі, зменшує зайняті ресурси, коли у цьому немає необхідності, і, таким чином, покращує ефективність використання ресурсів для збільшення доходу. Таке роз'єднання між програмним забезпеченням і апаратними засобами дозволяє також мігрувати віртуальні блоки. Дані властивості можна використовувати для перенесення критично важливих мережевих об'єктів при віртуалізації в безпечне місце під час стихійних лих [2].

У мережі з віртуалізацією мережевих функцій (Network Functions Virtualization – NFV) функції віртуальної мережі (Virtual Network Function – VNF) є програмним забезпеченням обробки трафі-

ка мережі, що працює на віртуальних машинах для обробки специфічних функцій мережі поверх апаратних засобів мережевої інфраструктури. Окремі функції віртуальної мережі можуть бути поєднані одна з одною як будівельні блоки, щоб запропонувати повномасштабний сервіс мережі зв'язку. VNF можна легко розгорнути або перерозподілити в будь-якому місці мережі.

Існуючі роботи, пов'язані з розгортанням VNF і міграцією, як правило, зосереджені на пропозиціях нових стратегій розгортання [3] і механізмів міграції [4]. Але вартість міграції не розглядається в цих дослідженнях. Насправді, вартість міграції є ключовим фактором в її процесі. Вона впливає на рішення про те, як вибрати кандидат VNF для перенесення і з'ясувати цільову позицію, яка підходить для міграції [5].

Стійкість обслуговування є важливою вимогою в будь-якій системі зв'язку, особливо в мобільних мережах. Крім того, доступність і надійність послуг, як зазначено в Рекомендації МСЕ-T E.800, визначають ключовий параметр характеристик якості обслуговування (QoS). В контексті хмарних мереж зв'язку забезпечувати стійкість сервісів стає проблемою. Дійсно, висока доступність є важливою вимогою, але не обов'язково є невід'ємною рисою хмарних обчислень. В хмарному середовищі на стійкість обслуговування може в значній мірі впливати відмова будь-якої VNF, що працює на віртуальній машині. Відмова VNF може статися через кілька факторів: відмова апаратних засобів (наприклад, через неправильне масштабування обладнання), вразливість програмного забезпечення та помилка в управлінні VNF або у її відповідній віртуальній машині, відмова на рівні гіпервізора через неправильну конфігурацію, негативний вплив на продуктивність за рахунок інших VNF, розміщених на одному фізичному вузлі, і зловмисні атаки проти VNF або менеджера віртуальної машини (тобто, гіпервізора) [6]. В операторській хмарі відмова VNF може вплинути на площину управління (наприклад, MME), а також на площину даних користувача (наприклад, S-GW або P-GW). Їх відмова істотно впливає на надання послуг, таким чином, важлива стійкість сервісів EPS шляхом визначення оперативних, масштабованих і надійних механізмів для відновлення після збоїв VNF [7].

Одна з основних проблем в контексті віртуалізації мережі полягає в тому, як ефективно використовувати фізичні ресурси (тобто центральний процесор, пам'ять вузлів і смугу пропускання каналів). В ряді досліджень [8,9] запропоновано різні методи для вирішення завдання відображення віртуальної мережі в надії встановлення ефективного використання фізичних ресурсів. У доповненні до методів, необхідних для ефективного відображення віртуальних мереж на фізичні мережі, потрібні методи, які керують ресурсами, вже виділеними активним

віртуальним мережам. На жаль, в літературі не описано таких методів. Отже, існує необхідність розробити методіку, яка може перемістити вже розміщені віртуальні вузли в разі відмови вузла при зведенні до мінімуму періоду переривання обслуговування.

У той час як адаптація шляхів для віртуальних мереж була розглянута у ряді робіт [8,10], проблема відмови вузла у віртуальних мережах була розглянуто лише у [11], проте не враховувалася вартість ресурсів на вузлі та кінцева якість обслуговування. Крім того, невирішеною залишалась задача вибору місць розташування вузлів управління.

У даній роботі представляється розподілений алгоритм відновлення вузла, який ефективно перерозподіляє віртуальні вузли, що постраждали від збою на фізичному вузлі. Основна мета пропонованої роботи полягає в розробці механізму самовідновлення віртуальної мережі, який може мінімізувати вартість відновлення вузла після відмови, а також підтримувати високий рівень фізичної працездатності мережі, що, в свою чергу, збільшує прибуток провайдера.

2. Модель мережі та постановка задачі

Фізична мережа задана у вигляді графа $SN=(N,L)$, де N є множиною фізичних вузлів і L – множиною каналів. Кожен канал $(n_1,n_2) \in L$, $n_1,n_2 \in N$ має максимальну пропускну здатність $cres(n_1,n_2)$ і мережеву затримку $L(n_1,n_2)$, а кожен вузол $n \in N$ пов'язаний з певними ресурсами $cres_n^i$, $i \in R$, де R – множина типів ресурсів. Мережа зв'язку представлена множиною ланцюгів сервісів (або запитів віртуальної мережі) T , які вбудовуються в фізичну мережу. Запит віртуальної мережі t , $t \in T$, можна представити як зважений граф $G_t=(V_t,E_t)$, де V_t є множиною віртуальних вузлів, що містить h_t елементів і позначається як $V_t=(v_{t,1},v_{t,2},\dots,v_{t,h_t})$, де $v_{t,j}$ означає j -у мережеву функцію у ланцюзі функцій t . E_t є множиною віртуальних каналів $e_t(v_{t,j},v_{t,g}) \in E_t$. Вимоги смуги пропускання каналу між двома функціями, j_1 і j_2 , що відносяться до ланцюга сервісів $t \in T$, позначаються як $d_t^{(j_1,j_2)}$, $d_t^{j,i}$ – кількість ресурсу типу i , що виділяється для мережевої функції j ланцюга t . Булеві змінні $x_n^{t,j}$ вказують, що мережева функція j , пов'язана з ланцюгом $t \in T$, розташовується на фізичному вузлі n , змінні $f_{(n_1,n_2)}^{t,(j_1,j_2)}$ визначають, що фізичний канал (n_1,n_2) використовується у шляху між j_1 та j_2 для запиту t . L_t – максимальна затримка для запиту $t \in T$; $costN(i,n)$ – вартість зайнятої одиниці ресурсу i на фізичному вузлі n , i $costL(n_1,n_2)$ – вартість зайнятої одиниці пропускну здатності на фізичному каналі $(n_1,n_2) \in L$; $suit_n^{t,j}$ означає, що функція j з запиту t може бути розміщена на вузлі n .

MN являє собою множину вузлів управління, де $MN \subseteq N$, які відповідають за функціонування пропонованого механізму відновлення після відмови. Кожен керуючий вузол пов'язаний з одним або де-

кількома вузлами фізичної мережі і виконує кроки, необхідні для відновлення після відмови мережі. Процес призначення вузлів управління і критерії, які враховуються при виборі вузлів управління, будуть досліджені далі.

У запропонованому підході припускаємо, що відображення запитів віртуальної мережі вже виконано (наприклад, з використанням підходу, визначеного в [9]).

Процес відображення віртуальної мережі відбувається в два етапи: відображення вузлів ($M_N: V_t \rightarrow N$) і відображення каналів ($M_L: E_t \rightarrow L$).

У пропонованому підході підкреслюється, що будь-яке переміщення віртуального вузла повинно виконуватись локально і бути координованим тільки вузлами управління.

3. Оптимальне розміщення вузлів управління у мережах, заснованих на NFV

Припускаємо, що вузли управління (далі – менеджери) можуть розміщуватись в точках, де оператор вже має сайт, тобто вузли управління розміщуються у вузлах N .

При заданій кількості менеджерів K існує скінченна множина з $\binom{|N|}{K}$ можливих розташувань. Відпо-

відно, розміщення менеджерів є задачею багатокритеріальної комбінаторної оптимізації. Метою задачі є знаходження таких розташувань менеджерів з множини можливих розташувань розміру K – $P_K = \left\{ P \in 2^{|N|} \mid |P| = K \right\}$, що є оптимальними відповідно до деякої цільової функції.

Метою оптимізації є визначення місця розташування кожного менеджера при заданій їх кількості K , так що мінімізується функція загальних витрат $Cost_K(\{p_k: k \in N\})$, де p_k – булева змінна, яка рівна одиниці, якщо менеджер розміщується в точці k . Задача оптимізації буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} & \min_{\{p_k: k \in N\}} Cost_K \\ & \text{при обмеженні } \sum_k p_k = K \end{aligned} \quad (1)$$

Основною метою хорошого розміщення менеджерів є мінімізація затримок між вузлами і менеджерами в мережі. Проте розглядати тільки затримки не достатньо. Розміщення менеджерів повинно також враховувати певні обмеження стійкості [12]. На рис. 1 показані різні питання, які необхідно враховувати при оцінці стійкості розміщення. Показано також нормалізовані затримки між вузлами та інтенсивність навантаження на вузлах.

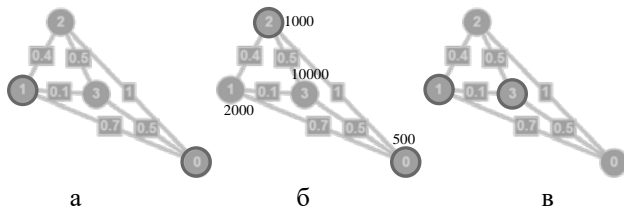


Рис. 1. Розміщення по різних критеріях: а -

мінімальної затримки до менеджера; б - мінімального дисбалансу навантаження на менеджерів; в - мінімальної затримки між менеджерами

Аналогічно до [12] припустимо, що вузли призначаються до їх найближчого менеджера, використовуючи як метрику затримки, тобто найкоротший шлях $dl_{g,k}$ між вузлом g і менеджером k . Кількість вузлів на менеджера може бути незбалансованою – чим більше вузлів менеджер повинен контролювати, тим вище навантаження на цього менеджера. Якщо кількість запитів вузла до менеджера в мережі збільшується, аналогічно поводить себе і ймовірність додаткових затримок через черги в системі управління. Для того щоб бути стійким від перевантаження менеджера, призначення вузлів різним менеджерам повинно бути добре збалансованим.

Цілком очевидно, що одного менеджера не досить, щоб досягти якої-небудь стійкості в мережі. Проте, коли кілька менеджерів розміщуються в мережі, логіка управління мережі розподіляється по декількох менеджерах і вони повинні синхронізуватися, щоб підтримувати несуперечний глобальний стан. Залежно від частоти синхронізації між менеджерами затримка між ними грає важливу роль.

На основі матриці dl , що містить відстані найкоротших шляхів між усіма вузлами, максимальний час затримки передачі між вузлом і менеджером для певного розміщення менеджерів може бути визначений як:

$$U_K^{latency}(p) = \max(ddd_k).$$

Тут ddd_k – максимальна затримка передачі від вузла мережі до менеджера в точці k ;

ddd_k розраховується так:

$$ddd_k = \max_{g \in V} latency_g \cdot \pi_{g,k},$$

де $latency_g$ – затримка між менеджером та вузлом g ,

$$latency_g = \min_{\{k: k \in V \wedge v_k=1\}} dl_{g,k};$$

$\pi_{g,k}$ – булева змінна, яка рівна одиниці, якщо вузол g обслуговується менеджером розміщеним в точці k .

Розглядаємо не середнє, а максимальне значення затримки, оскільки середнє приховує значення найгіршого випадку, що є важливим, коли стійкість повинна бути поліпшена.

Залежно від ситуації бажано мати приблизно рівне навантаження на всіх менеджерів, так щоб жоден менеджер не перевантажувався. Далі розглядаємо збалансований розподіл вузлів між менеджерами. Як формальну метрику вводимо баланс розміщен-

ня або, вірніше, дисбаланс, $U_K^{imbalance}$, тобто відхилення від повністю збалансованого розподілу як різниця між навантаженням на найбільш і найменш навантаженому менеджері.

$U_K^{imbalance}$ визначається в такий спосіб:

$$U_K^{imbalance}(p) = \max(ldc_k) - \min(ldc_k), \text{ де } ldc_k > 0,$$

ldc_k – навантаження на менеджера в точці k ;

ldc_k розраховується так:

$$ldc_k = \sum_{g \in V} load_g \cdot \pi_{g,k},$$

де $load_g$ – коефіцієнт навантаження на вузол g .

Як останній аспект стійкого розміщення менеджерів, розглянемо, як затримка між менеджерами може враховуватися при виборі розміщення менеджерів. Формально затримка між менеджерами $U_K^{interlatency}$ визначається як найбільша затримка між будь-якими двома менеджерами при заданому розміщенні:

$$U_K^{interlatency}(p) = \max_{\{k, g: k, g \in V \wedge p_k=1, p_g=1\}} dl_{g,k}.$$

Загалом, розміщення з урахуванням затримки між менеджерами мають тенденцію розміщувати всіх менеджерів набагато ближче один до одного. Це збільшує максимальну затримку від вузлів до менеджерів.

Таким чином, цільова функція оптимізації:

$$Cost_k = w_u^{latency} \times U_K^{latency}(p) + w_u^{imbalance} \times U_K^{imbalance}(p) + w_u^{interlatency} \times U_K^{interlatency}(p),$$

де w_u – множина вагових коефіцієнтів.

На рис. 2 показані можливі рішення по розміщенню двох менеджерів у мережі з 10 вузлами. Оптиміальне значення показує, що усі оптимізаційні цілі не можуть бути досягнуті одночасно.

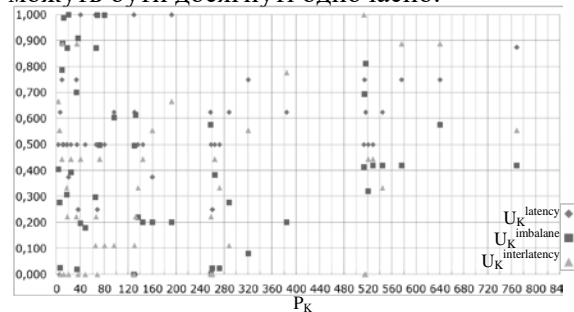


Рис. 2. Простір рішень оптимізаційної задачі розміщення менеджерів

4. Оптиміальне розміщення вузлів управління у мережах, заснованих на NFV

Процес переміщення вузлів віртуальної мережі, розміщених на вузлі, який відмовив, v_{tj}^{fail} , запускається, коли система відправляє запит на відновлення відповідному вузлу-менеджеру. Процес відновлення для кожного порушеного вузла віртуальної мережі протікає в такий спосіб: менеджер направляє запит на відновлення до всіх вузлів фізичної мережі, на яких розміщуються віртуальні вузли, суміжні з ураженими віртуальними вузлами. Кожен з цих вузлів буде деревом найкоротших шляхів (Shortest Path Tree – SPT) до всіх вузлів фі-

зичної мережі на відстані не більше 1 (поріг для максимального числа каналів встановлюється провайдером послуг) кроків від вузла, де коренем SPT виступає сам цей вузол. Менеджер використовує ці шляхи, щоб вибрати вузол з оптимальною відстанню до всіх вузлів фізичної мережі, де розташовані вузли віртуальної мережі, прилегли до несправного вузла. Цей вузол в кінцевому рахунку стає оптимальним кандидатом для розміщення ураженого віртуального вузла. Довжина результуючих шляхів з SPT буде не більше 1, максимальної кількості кроків, дозволеної для шляху, який відображає канал віртуальної мережі. Крім того, ємність кінцевих вузлів шляхів з SPT повинна бути не менша ємності віртуального вузла, розміщеного на несправному вузлі. Обираємо вузол з мінімальною вартістю шляху до всіх кореневих вузлів у деревах SPT та мінімальною вартістю обчислень. Алгоритм 1 (рис. 3) містить опис псевдокоду алгоритму відновлення вузла після відмови і виконується для всіх $\{v_{i,j} : x_n^{i,j}=1 \ \& \ n=failed\}$.

```

 $x_n^{i,j} \leftarrow 0$ 
 $S_1 \leftarrow \{ m : \exists (e_i(j,m)) \}$ 
for all  $\{ m \in S_1 \}$  do
   $f^{(j,m)} \leftarrow 0$ 
   $w_m \leftarrow M_N(V_{i,m})$ 
end for
 $S_2 \leftarrow \bigcup_{m \in S_1} w_m$ 
Менеджер направляє запит SPT всім фізичним вузлам у  $S_2$ 
for all  $w \in S_2$  do
  Виконати алгоритм SPT
   $S_{3,w} \leftarrow \{ q : length(q,w) \leq l \}$ 
end for
 $S_4 \leftarrow \emptyset$ 
for all  $q \in \bigcup_{w \in S_2} S_{3,w}$  do
  for all  $\{ m \in S_1 \}$  do
    if  $\exists (e_i(j,m))$  then
       $f_{(q,w_m)}^{(j,m)} \leftarrow 1$ 
    end if
  end for
  if  $(\sum_{(b_1,b_2) \in E_t} \sum_{(a_1,a_2) \in L} f_{(a_1,a_2)}^{(b_1,b_2)} \cdot L(a_1,a_2) \leq L_t \ \&\& \ d_t^{j,i} \leq c_{res} q^i \ \forall i \in R \ \&\& \ d_t^{(j,m)} \leq c_{res}(q,w_m) \ \forall m \in S_1)$  then
     $CostNL_q \leftarrow weight_1 \cdot \sum_{i \in R} d_i^{i,j} \cdot costN(i,q) + weight_2 \cdot \sum_{w \in S_2} costL(q,w_m) \cdot d_t^{(j,m)}$ 
  end if
end for
for all  $\{ m \in S_1 \}$  do
   $f^{(j,m)} \leftarrow 0$ 
end for
if  $S_4 = \emptyset$  then
  Виконати алгоритм Реконфігурації
else
  Обрати  $\min CostNL_q, q \in S_4$ 
   $q^* = argmin CostNL$ 
end if
 $x_{q^*}^{i,j} \leftarrow 1$ 
for all  $\{ m \in S_1 \}$  do
  if  $\exists (e_i(j,m))$  then
     $f_{(q^*,w_m)}^{(j,m)} \leftarrow 1$ 
  end if
end for

```

Рис. 3. Алгоритм відновлення вузла з відмовою

5. Висновки

Щоб впоратися зі значним зростанням трафіка мобільних даних, мобільний оператор освоює технології віртуалізації мережі та хмарних обчислень, щоб побудувати ефективні та гнучкі мобільні мережі та пропонувати їх як хмарний сервіс. У роботі

встановлено, що динамічне надання віртуалізованих ресурсів у системах мобільного зв'язку ставить нові задачі, не вирішені у попередніх дослідженнях систем надання ресурсів. У статті розглянута проблема відновлення віртуалізованої мережі, що постраждала від відмови на нижчерозташованому фізичному вузлі. Пропонований підхід виконується розподіленим способом. У дослідженні вирішена проблема розташування локальних вузлів управління з урахуванням параметрів затримки та стійкості, запропонована цільова функція комбінаторної оптимізаційної задачі розташування вузлів управління. Запропоновано метод динамічного відновлення вузлів з відмовою, який використовує евристичну модель для визначення оптимального місця міграції віртуалізованих функціональних вузлів.

Метод може застосовуватись при управлінні функціонуванням віртуалізованої мережі зв'язку для мінімізації витрат оператора зв'язку та покращення якості обслуговування абонентів. В подальших дослідженнях запропонований метод може бути розширений для урахування випадку відмови вузла через його перевантаження та можливості реконфігурації всієї системи.

Література:

1. Castro P.H.P. A joint CPU-RAM energy efficient and SLA-compliant approach for cloud data centers / P.H.P. Castro, V.L. Barreto, S.L. Corrêa, L.Z. Granville, K.V. Cardoso // Computer Networks. 2016. Vol. 94. P. 1-13.
2. Khan A. Virtual Network Embedding for telco-grade network protection and service availability/ A. Khan, X. An, S. Iwashina // Computer Communications. 2016. Vol. 84. P. 25-38.
3. Xiong G. A virtual service placement approach based on improved quantum genetic algorithm / G. Xiong, Y.-X. Hu, L. Tian, J.-L. Lan, J.-F. Li, And Q. Zhou // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2016. Vol. 17, No. 7. P. 661-671.
4. Gember-Jacobson A. OpenNF: Enabling Innovation in Network Function Control / A. Gember-Jacobson, R. Viswanathan, C. Prakash, R. Grandl, J. Khalid, S. Das, and A. Akella, // Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM, ser. SIGCOMM '14. New York, NY, USA, 2014. P. 163-174.
5. Xia J. Optimized Virtual Network Functions Migration for NFV/ J. Xia, Z. Cai, M. Xu // IEEE 22nd International Conference on Parallel and Distributed Systems. Wuhan, China, 2016. P. 340-346.
6. Scholler M. Resilient deployment of virtual network functions / M. Scholler, M. Stiemerling, A. Ripke, R. Bless // Proc. 5th Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT), 2013. P. 208-214.
7. Taleb T. On Service Resilience in Cloud-Native 5G Mobile Systems / T. Taleb, A. Ksentini, B. Sericola // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34, No. 3. P. 483-496.
8. Fajjari I. VNR Algorithm: A Greedy Approach For Virtual Networks Reconfigurations / I. Fajjari, N. Aitsaadi,

G. Pujolle and H. Zimmermann // IEEE Global Communications Conference, Exhibition and Industry Forum, Houston, United States, 2011.

9. *Skulysh M.* Model for Efficient Allocation of Network Functions in Hybrid Environment / M. Skulysh, L. Globa, S. Sulima // Information and Telecommunication Sciences. 2016. № 1. P. 39–45.

10. *Rahman M.R.* Survivable Virtual Network Embedding / M. R. Rahman, I. Aib, and R. Boutaba // IFIP International Federation for Information Processing, 2010.

11. *Abid H.* A novel scheme for node failure recovery in virtualized networks / H. Abid; N. Samaan // 2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013), Ghent, Belgium, 2013. P. 1154-1160.

12. *Hock D.* Pareto-optimal resilient controller placement in SDN-based core networks / D. Hock, M. Hartmann, S. Gebert, M. Jarschel, T. Zinner, P. Tran-Gia // 25th International Teletraffic Congress (ITC), Shanghai, 2013. P. 1-9.

Надійшла до редколегії 09.09.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Безрук В.М.

Суліма Світлана Валеріївна, аспірантка Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Наукові інтереси: мобільні мережі, NFV. Адреса: Україна, Київ, пров. Індустріальний, 2, тел. 0666245361.

Sulima Svitlana Valeriivna, Ph.D. student at National technical university of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute". Mobile networks, NFV. Address: Ukraine, Kyiv, pr. Industrialnyy 2, 0666245361.