

Л. С. Глоба, О. І. Романов, С. В. Суліма

Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

## МЕТОД РЕКОНФІГУРАЦІЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ З ВІРТУАЛІЗОВАНИМИ РЕСУРСАМИ

З врахуванням величезного зростання мобільного трафіку даних, з одного боку, та помірного середнього доходу на кожного користувача, з іншого боку, оператори мобільного зв'язку вивчають технології мережевої віртуалізації та технології хмарних обчислень для побудови економічно ефективних та еластичних мобільних мереж та їх пропонування як хмарних сервісів. **Предметом** вивчення в статті є процеси конфігурування телекомунікаційної мережі для вирішення завдань обробки службового навантаження. **Метою** є підвищення ефективності роботи мережі шляхом здійснення реконфігурації топології. **Завдання:** розробити математичну модель та відповідну процедуру реконфігурації ресурсів телекомунікаційної мережі при перевантаженнях або відмовах. Використовуваними **методами** є: графовий підхід та математичні моделі оптимізації для задачі перерозташування мережевих функцій, імітаційне моделювання для дослідження роботи запропонованого методу реконфігурації ресурсів в мережах з віртуалізацією. Отримані такі **результати**. У статті представлено метод локальної реконфігурації обчислювальних ресурсів віртуальної мережі у випадку відмови або перевантаження. **Висновки.** Отриманий метод враховує динамічну зміну топології мережі обслуговування та на відміну від існуючих дозволяє гнучко визначати конфігурацію обчислювальних ресурсів обслуговування, розміщати мережеві функції з мінімальними витратами та децентралізовано контролювати показники якості. Метод використовує евристичну модель для визначення оптимального місця міграції віртуалізованих мережевих функцій з фізичного вузла з відмовою або перевантаженням, а результати моделювання у системі Mathcad показують підвищення ефективності використання ресурсів. Проведені дослідження показали доцільність використання запропонованих рішень при вдосконаленні існуючих телекомунікаційних мереж та при побудові нових перспективних гнучких добре масштабованих мереж оператора зв'язку із повним або частковим застосуванням принципу віртуалізації мережевих функцій.

**Ключові слова:** NFV, виділення ресурсів, мобільна мережа, реконфігурація, міграція вузлів.

### Вступ

Очікується, що загальний трафік до 2022 року збільшиться до приблизно 77 екзабайтів [1], тому мобільні оператори шукають шляхи отримання економії від масштабування [2]. Віртуалізація мережевих функцій (Network Function Virtualization – NFV) дозволяє забезпечити економію за рахунок заміни великої кількості фізичних пристроїв програмним забезпеченням, що працює на розподілених хмарних платформах, і стає ключовою технологією для надання мережевих сервісів, особливо останнім часом у зв'язку з таким безпрецедентним зростанням трафіку та збільшення різноманіття та динамічності мережевих сервісів, якими користуються абоненти [3].

Хмарні обчислення (Cloud Computing) – це модель забезпечення повсюдного та зручного доступу на вимогу через мережу до спільного пулу ресурсів, що підлягають налаштуванню і які можуть бути оперативно надані та звільнені з мінімальними управлінськими затратами та зверненнями до провайдера [4]. Для того, щоб розмістити віртуальний вузол, фізична машина повинна надати всі ресурси, які вимагає віртуальна машина, в тому числі використання процесора, пам'ять, сховище та пропускну здатність [5].

NFV пропонує численні переваги для провайдерів телекомунікаційних сервісів, включаючи зниження вартості мережевого обладнання, мінімізацію споживання електроенергії, масштабованість, еластичність, повторне використання обладнання, легку мультитенантність та швидку конфігурацію нових

послуг [6]. NFV сервіси складаються з набору мережевих функцій. Кожна така композиція називається ланцюжком сервісних функцій – service function chain (SFC).

Ймовірним застосуванням концепції NFV є розгортання та масштабування таких вузлів мобільної мережі як MME, S/P-GW тощо, підтримуючи їх характеристики продуктивності на належному рівні економічно ефективним чином, на відміну від статичного варіанту, коли ресурси виділяються надмірно для найбільшого навантаження, а не на основі поточної ситуації у мережі. Крім того, важливим випадком використання є динамічна реконфігурація топології з метою реагування на зміни пов'язані з перевантаженням або відмовами.

Надзвичайну увагу в будь-якій телекомунікаційній системі приділяють стійкості обслуговування, яка характеризується принципом надійності п'яти дев'яток. В свою чергу хмарна платформа не завжди може її гарантувати, що пов'язано з відмовами на різних рівнях – апаратного забезпечення (наприклад, через помилки у масштабуванні), програмних засобів, помилок в управлінні віртуалізованими мережевими функціями, на рівні гіпервізора у зв'язку з неправильною конфігурацією, зменшення продуктивності через вплив навантаження на вузол з інших мережевих функцій, зловмисних атак, тощо [7]. Загалом відмови серверів мають вищу інтенсивність відмов ніж телекомунікаційне апаратне забезпечення [8]. Крім того можуть виникати випадки, коли провайдер інфраструктури буде

здійснювати задачі техобслуговування вузлів і це потребуватиме міграції вузлів або наявних на вузлах ресурсів буде недостатньо для забезпечення заданого рівня якості обслуговування.

Відображення SFC на фізичний субстрат є надзвичайно активним напрямком досліджень. Наприклад, такі методи пропонуються у [9]. Проте мало уваги приділялося оптимальному здійсненню реконфігурації віртуалізованих мобільних мереж.

В існуючих роботах увага зосереджується на стратегіях розгортання [10] і механізмах міграції [11, 12]. Проте важливим фактором при здійсненні міграції виступають витрати пов'язані з нею, які повинні враховуватись при виборі цільового розташування вузла та самого вузла, що мігрує. Хоча проблема адаптації шляхів у контексті віртуалізованих мереж розглядалась у ряді досліджень [13, 14], вирішення задачі відновлення роботи віртуалізованого вузла після відмови було висвітлено лише у [8], при цьому не було враховано витрати пов'язані з використанням ресурсів на вузлах та кінцева якість обслуговування. Невирішеними раніше залишались питання вибору вузлів, які будуть виступати менеджерами реконфігурації, а також не розглянуто випадок відмови вузла через надмірне навантаження, що надходить на нього, і задача вибору місць міграції віртуалізованих вузлів у разі глобальної реконфігурації мережі.

Далі припускаємо, що оптимальне розміщення віртуалізованих мережевих функцій вже виконано (наприклад, відповідно до методу описаному у [15]), а оптимальне розміщення вузлів керування (менеджерів) у мережах, заснованих на NFV, здійснено відповідно до методу описаному у [16]. У даній роботі представляється метод, який ефективно перерозподіляє віртуальні вузли, на які впливає перевантаження на фізичному вузлі. Основна мета пропонованої роботи полягає в розробці механізму самовідновлення віртуальної мережі, який може мінімізувати період переривання обслуговування і вартість відновлення вузла після відмови, а також підтримувати високий рівень фізичної працездатності мережі, що, в свою чергу, збільшує прибуток провайдера.

**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  $cap(n_1, n_2)$  і мережеву затримку  $L(n_1, n_2)$ , а кожен вузол  $n \in N$  пов'язаний з певними ресурсами  $res_n^i, i \in R$ , 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 зв'язаний 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  $j$ -ту 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,  $j1$  і  $j2$ , що відносяться до ланцюга сервісів  $t \in T$  позначається

як  $d_t^{(j1,j2)}, d_t^{j1}$  – кількість ресурсу типу  $i$ , що виділяється для мережевої функції  $j$  ланцюга  $t$ . Булеві змінні  $x_n^{t,j}$  вказують, чи мережева функція  $j$ , пов'язана з ланцюгом  $t \in T$ , розташовується на фізичному вузлі  $n$ , змінні  $f_{(n1,n2)}^{t,(j1,j2)}$  визначають, чи фізичний канал  $(n1, n2)$  використовується у шляху між  $j1$  та  $j2$  для запиту  $t$ .  $L_t$  – максимальна затримка для запиту  $t \in T$ .  $\cos tN(i, n)$  – вартість зайнятої одиниці ресурсу  $i$  на фізичному вузлі  $n$ , і  $\cos tL(n1, n2)$  – вартість зайнятої одиниці пропускну здатності на фізичному каналі  $(n1, n2) \in L$ .  $suit_n^{t,j}$  означає що функція  $j$  з запитом  $t$  може бути розміщена на вузлі  $n$ .

$MN$  являє собою множину вузлів керування, де  $MN \subseteq N$ , які відповідають за функціонування пропонованого механізму відновлення після відмови. Кожен керуючий вузол пов'язаний з одним або декількома вузлами фізичної мережі і виконує кроки, необхідні для відновлення після відмови мережі (рис. 1). Процес призначення вузлів керування і критерії, які враховуються при виборі вузлів керування, досліджені у [16].



Рис. 1. Система з вузлом з відмовою

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

**Метод відновлення мережі після відмови або перевантаження**

Процес переміщення вузлів віртуальної мережі, розміщених на вузлі, який відмовив,  $v_{i,j}^{fail}$ , запускається, коли система відправляє запит на відновлення відповідному вузлу-менеджеру. Процес відновлення для кожного 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 фізичної мережі на відстані не більше  $l$  (поріг встановлюється провайдером послуг) 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 відстані, дозволеної для шляху, який відображає канал віртуальної мережі. Крім того, ємність кінцевих вузлів шляхів з SPT повинна бути не менше ємності віртуального вузла, розміщеного на несправному фізичному вузлі. Обираємо вузол з мінімальною вартістю шляху до всіх кореневих вузлів у деревах SPT та мінімальною вартістю обчислень. Рис. 2 містить опис псевдокоду алгоритму відновлення вузла після відмови і виконується для всіх  $\{v_{i,j} : x_n^{t,j}=1 \text{ \& } n = \text{failed}\}$ .

```

 $x_n^{t,j} \leftarrow 0$ 
 $S_1 \leftarrow \{m : \exists (e_t(j,m))\}$ 
for all  $\{m \in S_1\}$  do
   $f_{(j,m)} \leftarrow 0$ 
   $w_m \leftarrow M_N(v_{t,m})$ 
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
   $S_{3,w} \leftarrow \{q : \text{length}(q,w) \leq l\}$ 
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  $\exists (e_t(j,m))$  then
       $f_{(q,w_m)}^{t,(j,m)} \leftarrow 1$ 
    end if
  end for
  if  $(\sum_{(b_1,b_2) \in E_t} \sum_{(a_1,a_2) \in L} f_{(a_1,a_2)}^{t,(b_1,b_2)} \cdot L(a_1,a_2) \leq L_t \text{ \& \& } d_t^{i,j} \leq \text{cres}_q^i \forall i \in R \text{ \& \& } d_t^{(j,m)} \leq \text{cres}(q,w_m) \forall m \in S_1)$  then
     $\text{CostNL}_q \leftarrow \text{weight}_1 \cdot \sum_{i \in R} d_t^{i,j} \cdot \text{costN}(i,q) + \text{weight}_2 \cdot \sum_{w \in S_2} \text{costL}(q,w_m) \cdot d_t^{(j,m)}$ 
     $S_4 \leftarrow S_4 \cup q$ 
  end if
  for all  $\{m \in S_1\}$  do
     $f_{(j,m)} \leftarrow 0$ 
  end for
end for
if  $S_4 = \emptyset$  then
  Виконати алгоритм Реконфігурації
else
  Обрати  $\min \text{CostNL}_q, q \in S_4$ 
   $q^* = \text{argmin CostNL}$ 
end if
 $x_{q^*}^{t,j} \leftarrow 1$ 
for all  $\{m \in S_1\}$  do
  if  $\exists (e_t(j,m))$  then
     $f_{(q^*,w_m)}^{t,(j,m)} \leftarrow 1$ 
  end if
end for
end for

```

Рис. 2. Алгоритм відновлення вузла з відмовою

У мережі існує ймовірність відмови вузла через перевантаження. Для виконання відновлення при відмові вузла в перевантаженій мережі, виконується процедура міграції віртуальних вузлів, розміщених на перевантаженому фізичному вузлі.

Процес відновлення починається з сортування всіх віртуальних вузлів, розміщених на перевантаженому фізичному вузлі. Критерієм (CRT на рис. 3) виступає ємність віртуальних вузлів. Потім виконується процедура відновлення на першому відсортованому вузлі віртуальної мережі, що має ємність рівну перевантаженню, для переміщення на новий вузол фізичної мережі.

$n$  = перевантажений  
 $S_1$  ← Відсортувати віртуальні вузли, що розміщуються на  $n$  у зростаючому порядку на основі критерію CRT  
 Вибрати з  $S_1$  перший віртуальний вузол  $v_{t,j}$  де ємність ресурсів не менше перевантаженої ємності  $d_t^{i,j} \geq \Delta \text{cres}_n \forall i \in R$   
 Виконати алгоритм Відновлення Вузла з Відмовою

Рис. 3. Алгоритм відновлення вузла з перевантаженням

За результатами моделювання (рис. 4) запропонований метод показав до 27% менші умовні витрати у порівнянні зі стратегією направленою на мінімізацію затримки, при цьому затримка знаходилась у допустимих межах але була на 20% більшою.

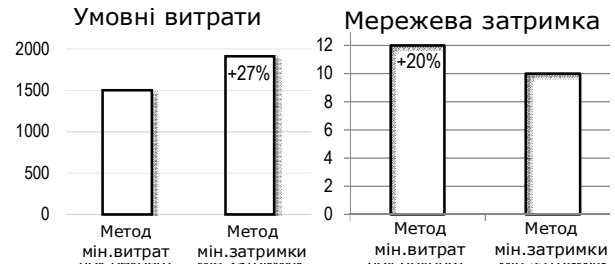


Рис. 4. Результати експерименту

## Реконфігурація перевантажених мереж

Коли навантаження або ресурси змінюються, деякі віртуальні мережеві функції (VNF) можливо доведеться перемістити. Існує ймовірність того, що знайти новий вузол-кандидат для вузла віртуальної мережі, розміщеного на вузлі з відмовою, не вийде. В такому випадку виконується процедура реконфігурації для міграції одного або декількох віртуальних вузлів для переміщення розміщених вузлів віртуальної мережі. Розглянемо задачу міграції як задачу оптимізації, яка спрямована на мінімізацію загальної вартості міграції при обмеженнях допустимої затримки і обчислювальних ресурсів.

Метою оптимізації є знаходження розташування ланцюгів сервісів мережі (тобто розміщення мережевих функцій та розподіл ресурсів, а також визначення шляхів передачі трафіку між ними), так щоб мінімізувати витрати на зайняті ресурси каналів і вузлів у фізичній мережі, при цьому задовольняючи вимоги трафіку. Сформулюємо цільову функцію у вигляді лінійної комбінації (з ваговими коефіцієнтами  $a, b, c, e$ ) вартісних виразів.

Визначимо бінарну змінну  $x_n^{t,j} \in \{0, 1\}$ , для позначення того, що VNF  $j$  пов'язана з ланцюгом сервісу  $t$  розміщується на вузлі  $n$  після міграції. Індикатор  $x_n^{t,j} = 0$  означає, що VNF  $j$  не розміщується на вузлі  $n$  після міграції; в іншому випадку  $j$  розміщується на вузлі  $n$  після міграції.

Введемо бінарну змінну  $y_n^{t,j}$  для індикації стану мережі перед міграцією. Вона схожа зі змінною  $x_n^{t,j}$ ,  $y_n^{t,j} = 0$  означає, що VNF  $j$  ланцюга  $t$  не перебуває на вузлі  $n$  до міграції; в іншому випадку,  $j$  розташована на вузлі  $n$  до міграції.

Таким чином, можемо використовувати індикатор  $I^{t,j}$ , щоб вказати чи VNF  $j$  ланцюга  $t$  було переміщено в поточному процесі міграції:

$$I^{t,j} = \sum_{n \in N} x_n^{t,j} \cdot y_n^{t,j}$$

$I^{t,j} = 0$  вказує, що VNF було переміщено в поточному процесі міграції, і  $I^{t,j} = 1$  вказує, що VNF не було переміщено.

$x_n \in \{1, 0\}$  позначає чи  $n$ -й фізичний сервер працює або ні після міграції.  $y_n \in \{1, 0\}$  позначає чи  $n$ -й фізичний сервер працює або ні перед міграцією.

Для того щоб розглянути ресурси, які споживаються при міграції та запуску серверів, вводимо такі вирази:

–  $B_n$  позначає необхідні витрати  $b_n$  для запуску  $n$ -го серверу:

$$B_n = b_n x_n (x_n - y_n);$$

–  $L_i^{t,j}(n \rightarrow n')$  позначає використання ресурсу  $i$  для міграції VNF  $j$  з ланцюгу сервісу  $t$  з серверу  $n$  на сервер  $n'$ .

$$L_i^{t,j}(n \rightarrow n') = l_i(d^{t,j}) + l'_i(d^{t,j}),$$

де  $l_i(x)$  – функція використання ресурсу  $i$  для міграції з серверу,  $l'_i(x)$  – функція використання ресурсу  $i$  для міграції на сервер.

Цільова функція буде визначатися таким чином:

$$\begin{aligned} Cost_M = & a \cdot \sum_{n \in N} (B_n + x_n \cdot costN(n)) + \\ & + b \cdot \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \sum_{j \in V} \sum_{i \in R} x_n^{t,j} \cdot d_i^{t,j} \cdot costN(i, n) + \\ & + c \cdot \sum_{(n_1, n_2) \in L} costL(n_1, n_2) \cdot \sum_{t \in T} \sum_{(j_1, j_2) \in E} f_{(n_1, n_2)}^{t, (j_1, j_2)} \cdot d_t^{(j_1, j_2)} + \\ & + e \cdot \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} L_i^{t,j}(n \rightarrow n') \cdot x_{n'} \cdot (x_{n'} - y_n). \end{aligned}$$

Використовуючи наведені вище міркування, формулюємо задачу таким чином.

$$Cost_M \rightarrow \min$$

при  $\sum_{n \in N} x_n^{t,j} = 1 \quad \forall t \in T, j \in V;$

$$x_n^{t,j} \leq suit_n^{t,j} \quad \forall t \in T, j \in V, n \in N;$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in V} \left( x_n^{t,j} \cdot d_i^{t,j} + y_n^{t,j} \cdot (1 - I^{t,j}) \cdot l_i(d^{t,j}) + x_n^{t,j} \cdot (1 - I^{t,j}) \cdot l'_i(d^{t,j}) \right) \leq c_n^i \quad \forall n \in N, i \in R;$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{(j_1, j_2) \in E} f_{(n_1, n_2)}^{t, (j_1, j_2)} \cdot d_t^{(j_1, j_2)} \leq c(n_1, n_2) \quad \forall (n_1, n_2) \in L;$$

$$\begin{aligned} \sum_{(n,w) \in L} f_{(w,n)}^{t, (j_1, j_2)} - f_{(n,w)}^{t, (j_1, j_2)} = \\ = x_n^{t, j_1} - x_n^{t, j_2} \quad \forall t \in T, n \in N, (j_1, j_2) \in E; \end{aligned}$$

$$\sum_{(j_1, j_2) \in E} \sum_{(n_1, n_2) \in L} f_{(n_1, n_2)}^{t, (j_1, j_2)} \cdot L(n_1, n_2) \leq L_t \quad \forall t \in T.$$

## ВИСНОВКИ

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 представлено розподілений алгоритм відновлення вузла, який ефективно перерозподіляє віртуальні вузли, що постраждали від збою на фізичному вузлі через перевантаження або відмову. Запропонована схема спирається на співпрацю множини розподілених керуючих вузлів – менеджерів, розміщених на ряді фізичних вузлів для виконання цього завдання. Процес запускається приходом повідомлення про відмову вузла фізичної мережі. Призначений керуючий вузол посилає запити до фізичних вузлів, що містять сусідні вузли до постраждалих віртуальних вузлів для пошуку нового кандидата фізичного вузла. Пошук виконується шляхом побудови найкоротшого шляху (Shortest Path Tree – SPT) від сусідніх вузлів для всіх вузлів-кандидатів в певних межах відстані в фізичній мережі. Розраховані SPT потім використовуються для визначення оптимального вузла-кандидата. Пропонований метод ефективно зменшує вартість відновлення вузла після збоїв, зазнавану затримку і час переривання сервісу під час цього процесу, максимізуючи дохід телекомунікаційного провайдера.

Метод може застосовуватись при управлінні функціонуванням віртуалізованої мережі зв'язку для мінімізації витрат оператора зв'язку та покращення якості обслуговування абонентів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Ericsson mobility report, Tech. Rep. Rep. EAB-17, vol. 005964 Uen, Revision B, June 2017 [Online]. – Available at: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017-rnea.pdf>
- Zorello L. M. M. Improving Energy Efficiency in NFV Clouds with Machine Learning / L. M. M. Zorello, M. G. T. Vieira, R. A. G. Tejos, M. A. T. Rojas, C. Meirosu, T. C. M. B. Carvalho // 2018 IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). – San Francisco, CA, USA, 2018. – P. 710-717.
- Leivadeas A. Balancing Delay and Cost in Virtual Network Function Placement and Chaining / A. Leivadeas, M. Falkner, I. Lambadaris, M. Ibnkahla, G. Kesidis // 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft). – Montreal, QC, Canada, 2018. – P. 433-440.
- Sitaram D. Moving To The Cloud: Developing Apps in the New World of Cloud Computing / D. Sitaram, G. Manjunath. – Massachusetts: Syngress, 2011. – 468 p.
- Vu H.T. A Traffic and Power-aware Algorithm for Virtual Machine Placement in Cloud Data Center / H.T. Vu, S. Hwang // International Journal of Grid and Distributed Computing. – 2014. – Vol. 7, No. 1. – pp. 21-32.
- Ghrada N. Price and Performance of Cloud-hosted Virtual Network Functions: Analysis and Future Challenges / N. Ghrada, M. F. Zhani, Y. Elkhatib // 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft). – Montreal, QC, Canada, 2018. – P. 482-487.
- Scholler M. Resilient deployment of virtual network functions / M. Scholler, M. Stiernerling, A. Ripke, R. Bless // Proc. 5th International Congress Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT). – St. Petersburg, Russia, 2013. – P. 208-214.
- 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.
- Eramo V. Computing and Bandwidth Resource Allocation in Multi-Provider NFV Environment / V. Eramo, F.G. Lavacca // IEEE Communications Letters. – 2018. – P. 1-4.

10. 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.
11. 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.
12. Rajagopalan S. Split/Merge: System Support for Elastic Execution in Virtual Middleboxes / S. Rajagopalan, D. Williams, H. Jamjoom, and A. Wareld // *10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 13)*. – Lombard, IL, USA, 2013. – P. 227-240.
13. 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. – P. 1-7.
14. Rahman M.R. Survivable Virtual Network Embedding / M. R. Rahman, I. Aib, and R. Boutaba // *NETWORKING 2010*. – 2010. – P. 40-52.
15. Globa L. Method for resource allocation of virtualized network functions in hybrid environment / L. Globa, M. Skulysh, S. Sulima // *2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 6–9 June 2016 : conference proceedings. — Varna, Bulgaria, 2016. — P. 1–5.
16. Суліма С. В. Метод відновлення мережі у віртуалізованому середовищі / С. В. Суліма // *Радіоелектроніка та інформатика*. — 2017. — № 4(79). — С. 4–8.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. І. Приходько,

Український державний університет залізничного транспорту, Харків

Received (Надійшла) 12.12.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.01.2019

### Метод реконфігурації мережі зв'язу з віртуалізованими ресурсами

Л. С. Глоба, А. І. Романов, С. В. Суліма

С учетом огромного роста мобильного трафика данных, с одной стороны, и умеренного среднего дохода на каждого пользователя, с другой стороны, операторы мобильной связи изучают технологии сетевой виртуализации и технологии облачных вычислений для построения экономически эффективных и эластичных мобильных сетей и их предоставление как облачных сервисов. **Предметом** изучения в статье являются процессы конфигурирования телекоммуникационной сети для решения задач обработки служебной нагрузки. **Целью** является повышение эффективности работы сети путем осуществления реконфигурации топологии. **Задача:** разработать математическую модель и соответствующую процедуру реконфигурации ресурсов телекоммуникационной сети при перегрузках или отказах. Используемыми **методами** являются: графовый подход и математические модели оптимизации для задачи перераспределения сетевых функций, имитационное моделирование для исследования работы предложенного метода реконфигурации ресурсов в сетях с виртуализацией. Получены следующие **результаты**. В статье представлен метод локальной реконфигурации вычислительных ресурсов виртуальной сети в случае отказа или перегрузки. **Выводы.** Полученный метод учитывает динамическое изменение топологии сети обслуживания и в отличие от существующих позволяет гибко определять конфигурацию вычислительных ресурсов обслуживания, размещать сетевые функции с минимальными затратами и децентрализованно контролировать показатели качества. Метод использует эвристическую модель для определения оптимального места миграции виртуализированных сетевых функций физического узла с отказом или перегрузкой, а результаты моделирования в системе Mathcad показывают повышение эффективности использования ресурсов. Проведенные исследования показали целесообразность использования предложенных решений при совершенствовании существующих телекоммуникационных сетей и при построении новых перспективных гибких хорошо масштабируемых сетей оператора связи с полным или частичным применением принципа виртуализации сетевых функций.

**Ключевые слова:** NFV, выделение ресурсов, мобильная сеть, реконфигурация, миграция узлов.

### Reconfiguration method for communication network with virtualized resources

L. Globa, O. Romanov, S. Sulima

Given the enormous growth in mobile data traffic, on the one hand, and moderate average revenue per user, on the other hand, mobile operators are exploring network virtualization technologies and cloud computing technologies to build cost-effective and flexible mobile networks and offer them as cloud-based services. The **subject** of study in the article are the configuration processes of the telecommunication network to solve the tasks of service load processing. The **goal** is to increase the efficiency of the network by reconfiguring the topology. **Objective:** to develop a mathematical model and an appropriate procedure for reconfiguring the telecommunication network resources of the in case of overloads or failures. The **methods** used are: graph approach and mathematical optimization models for the task of reallocation of network functions, simulation for research of the proposed method of resources reconfiguration in networks with virtualization. The following **results** are obtained. The article presents a method of virtual network computing resources local reconfiguration in case of a failure or overload. **Conclusions.** Obtained method takes into account the dynamic change in the service network topology, and unlike the existing ones, allows flexible determination of the computing service resources configuration, placing network functions with minimal costs, and decentralized monitoring of quality indicators. The method uses a heuristic model to determine the optimal location for migration of virtualized network functions from a physical node with a failure or overload, and the simulation results in the Mathcad system show an increase in resource efficiency. The conducted studies have shown the expediency of using the proposed solutions in improving existing telecommunication networks and in the construction of new perspective flexible, well-scalable networks of the telecom operator with full or partial application of the network functions virtualization principle.

**Keywords:** NFV, resource allocation, mobile network, reconfiguration, node migration.