

О. В. Зінченко<sup>1</sup>, В. В. Вишнівський<sup>1</sup>, В. М. Гладких<sup>2</sup>, С. В. Прокопов<sup>1</sup>, О. С. Звенігородський<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Державний університет телекомунікацій

<sup>2</sup>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

## АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ SDN / NFV

**Анотація.** Традиційні телекомунікаційні мережі проектувалися в розрахунку на використання спеціалізованих апаратних пристроїв (маршрутизаторів, Ethernet-комутаторів та ін.). Ці пристрої створювалися на базі специфічних апаратних і програмних платформ окремих вендорів. Розгортання таких мережевих пристроїв призводило до тривалих циклів проектних і пусконаладжувальних робіт, а, отже, і до уповільнення виведення на ринок нових продуктів і послуг. Обслуговування та управління мереж такого типу було і залишається досить неефективним і дорогим. Спільне використання SDN та NFV змінює традиційну парадигму будівництва мережі, яка полягає в тому, як оператор проектує, розвиває, адмініструє мережу, і надає продукти і послуги користувачам. Така зміна парадигми може дати багато технологічних і операційних переваг. Зрушення парадигми націлене на фундаментальне переосмислення структури витрат оператора і режиму його операційних процесів. Цей зсув, при його відповідному використанні, також здатний забезпечити швидку і гнучку розробку послуг на вимогу, що підвищує конкурентоспроможність оператора на ринку телекомунікаційних і інформаційних послуг. В статті наводиться аналіз переваг впровадження сучасних технологій віртуалізації мережевих функцій. Об'єднання SDN з NFV надає великі переваги, однак проблема полягає в їх інтеграції. В цілому стаття присвячена дослідженню способів інтеграції віртуалізованих мережевих функцій та контролера SDN. Для такої інтеграції є дві можливі архітектури: контролер SDN взаємодіє з віртуалізованими мережевими функціями (VNF) або комутатор взаємодіє з VNF. У цій статті наведено аналітичний опис обох варіантів. Таким чином, стаття спрямована на створення математичної моделі для аналітичного моделювання SDN з NFV та в кінцевому підсумку підвищенню продуктивності та прискоренню впровадження сучасних мережевих технологій.

**Ключові слова:** віртуалізація мережевих функцій; SDN; системи масового обслуговування; OpenFlow.

### Вступ

Традиційно мережа будується на виділеному обладнанні, такому як маршрутизатори і комутатори, з мережевим програмним забезпеченням, що надається постачальниками мережі. Можливості інженера по налаштуванню мережевого програмного забезпечення дуже обмежені в основному створювачем обладнання. Це призвело до створення концепції програмно-конфігурованої мережі (SDN), в якій гнучкість і динамізм були внесені у віртуалізовану площину управління. Основний підхід при створенні SDN полягає в поділі мережі на площину управління і площину даних, що дозволяє централізовано керувати різними мережевими пристроями. Основна перевага концепції SDN - можливість програмування управління мережевими пристроями. Це дозволило мережевим інженерам змінити конфігурацію мережі і логіку потоку даних відповідно до бізнес-вимог.

З іншого боку, віртуалізація мережевих функцій (NFV) - це новий підхід, який розгортає або проектує різні мережеві функції. Він відокремлює мережеві функції, такі як NAT, кешування DNS та ін. від пропріетарних апаратних пристроїв, щоб їх можна було реалізувати на віртуальних машинах, покращуючи якість їх обслуговування.

Є велика кількість робіт [3-10] з моделювання SDN. Жодна з них не враховує NFV в своєму аналітичному моделюванні.

В двох відомих роботах [1, 2] досліджувалась продуктивність архітектури SDN/NFV за допомогою моделювання та експериментів. Однак в цих роботах не представлено аналітичної моделі для архітектури SDN, що поєднується з NFV.

Традиційні телекомунікаційні мережі проектувалися з розрахунку на використання спеціалізованих апаратних пристроїв (маршрутизаторів, Ethernet-комутаторів та іншого обладнання). Ці пристрої створювалися на базі специфічних апаратних і програмних платформ окремих вендорів. Розгортання цих мережевих елементів призводило до тривалих циклів проектування і пуско-налагоджувальних робіт, а, отже, і до уповільнення виведення на ринок нових продуктів і послуг. Обслуговування та управління такою мережею було досить неефективним і дорогим. Все це призводило до того, що зростання інвестицій в розвиток мережі для задоволення запитів абонентів перевищувало зростання доходів від надання послуг в ній. Тому, в даний час багато операторів вибирають шлях цифрової трансформації на базі технологій SDN / NFV.

Основні властивості мережі, побудованої за принципами SDN / NFV:

- поділ площин управління і передачі даних;
- віртуалізація мережевих функцій;
- програмоване управління мережевими ресурсами, обчислювальними ресурсами, і ресурсами зберігання даних, а також оркестрації послуг;
- стандартизація протоколів і автоматизація конфігурації мережевих елементів;
- єдиний механізм адміністрування і виділення ресурсів мережі за запитом для різних послуг і функцій;
- автоматизація управління, розгортання мережевих елементів і бізнес-процесів.

Комплексне використання цих нових властивостей дозволяє реалізувати динамічне підстроювання мережі під потреби додатків, що підвищує операційну гнучкість і спрощує розгортання послуг.

Існують різні підходи до об'єднання SDN з NFV. Оскільки контролер визначає, який екземпляр віртуалізованої мережевої функції (VNF) обслуговує пакети, яким потрібні мережеві функції (для стислості, пакети NFV), пакети NFV можуть бути перенаправлені на контролер з комутатора. Потім контролер пересилає ці пакети NFV в відповідну VNF для виконання необхідних мережевих функцій. Тобто пакети NFV будуть проходити через контролер. Цей підхід будемо називати SDN з NFV під контролером (NFV\_варіант1).

Інший підхід полягає в тому, що деякі з пакетів NFV відправляються з контролера, контролер визначає, який екземпляр VNF обслуговуватиме ці пакети, і запускає відповідні дії для комутатора. Наступні пакети NFV, що належать одному і тому ж потоку, можуть бути безпосередньо перенаправлені в певний екземпляр VNF без контролера. Надалі будемо називати цей підхід SDN з NFV поза контролера (NFV\_варіант2).

Основна мета даної роботи - провести аналітичне моделювання різних архітектур SDN / NFV.

### Основна частина

Проведемо аналіз двох архітектур SDN, в яких NFV знаходиться під контролером або в стороні від нього, а також розглядаються поточні роботи по моделюванню SDN.

В архітектурі NFV\_варіант1, яка приведена на рис. 1, а, контролер безпосередньо взаємодіє з VNF.

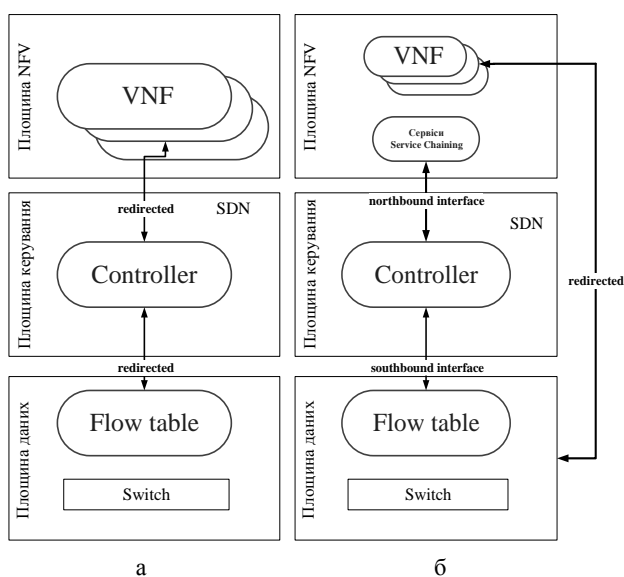


Рис. 1. Архітектура SDN: а – традиційна, де NFV знаходиться під управлінням контролера (NFV\_варіант1); б – NFV знаходиться в стороні від контролера (NFV\_варіант2)

Загальна процедура виглядає наступним чином. Спочатку пакет NFV потрапляє в комутатор. Потім, в залежності від дії в таблиці потоків, пакет NFV пересилається до контролера. Контролер визначить, який екземпляр VNF обслуговує його, і направить його до заданого екземпляру. Після того, як пакет NFV буде оброблений необхідною мережевою функцією, він повертається до контролера, і контролер

відправляє його назад до комутатора. Оскільки дія в таблиці потоків перенаправляється на контролер, всі пакети NFV, що належать одному потоку, будуть відправлені на контролер.

Основна перевага цієї архітектури полягає в тому, що пакети NFV можуть бути відправлені в різні екземпляри VNF для балансування навантаження. В архітектурі (NFV\_варіант2), показаної на рис. 1, б [2], комутатор безпосередньо взаємодіє з VNF. В системі існує модуль ланцюжка сервісів, який вибирає схожі екземпляри VNF і визначає порядок ланцюжка. Модуль ланцюжка сервісів зв'язується з контролером через північні інтерфейси (northbound interface). У цій архітектурі контролер відповідає за витяг мережевих подій, збір статистики і аналіз корисного навантаження для вибору відповідних екземплярів VNF і їх ланцюжка для екземпляра NFV. Після отримання відповіді від модуля об'єднання сервісів контролер встановлює відповідну дію в комутаторі і відправляє пакет NFV назад до комутатора. Цей пакет, як і раніше повинен перейти в VNF від комутатора, щоб отримати необхідну мережеву функцію. Наступні пакети NFV, що належать одному і тому ж потоку, можуть бути безпосередньо перенаправлені від комутатора до певних екземплярів VNF без контролера.

Основна перевага цієї архітектури полягає в тому, що більшість пакетів NFV можливо пересилати безпосередньо в VNF, що значно знижує навантаження на контролер.

Однак більшість пакетів NFV, що належать до одного потоку, будуть перенаправлені в один і той же екземпляр. Таким чином, екземпляри VNF будуть збалансовані по навантаженню, що призводить до більш високої тимчасової затримки в наданні мережевих функцій.

**Роботи з моделювання SDN.** Відомо кілька робіт з аналітичного моделювання SDN. Наведемо короткий огляд цих робіт. В роботі [3] моделювання SDN було виконано з використанням теорії масового обслуговування зі зворотним зв'язком. Ця теорія використовується для демонстрації взаємодії між площиною управління і площиною даних.

В роботі [4] було розроблено аналітичну модель мережі SDN. У цій роботі були розроблені обмеження розміру буфера і затримки пакетів.

В роботі [5] представлені поліпшення в порівнянні з [3] шляхом моделювання SDN, як модифікованої мережі Джексона. Автори оцінили швидкість передачі пакетів від контролера до комутатора, так що фактично можна було отримати загальну швидкість надходження пакетів в комутатор. Автори розширили свою попередню роботу і запропонували аналітичну модель для SDN з декількома комутаторами [6]. У цій моделі вони вираховували середню затримку шляху від джерела до пункту призначення, а не середню затримку пакета в комутаторі.

Автори роботи [9] вважають, що комутатори мають дві черги: чергу з високим пріоритетом для пакетів, відправлених назад від контролера, і черга з низьким пріоритетом для нових пакетів, що надходять від інших комутаторів. Отже, пакети, які пове-

ртаються контролером, мають більш високий пріоритет для доставки, щоб зменшити їх затримку. Для подання цієї системи було створено тривимірний стан (довжина черги контролера, довжина черги з високим пріоритетом і довжина черги з низьким пріоритетом). Автори вивели ймовірності переходу між станами і спробували знизити складність отримання ймовірності сталого стану.

Однак жодна з відомих робіт не розглядала в своїх моделях одночасно SDN та NFV.

**Моделювання систем NFV.** При моделюванні різних архітектур систем SDN з NFV, були прийняті наступні допущення:

- процес надходження даних в комутатор є пуассонавським процесом;
- передбачається, що час обслуговування пакетів в мережевих пристроях описується експоненціальним розподілом;
- черги нескінченні.

Розглянемо архітектуру, яку ми позначили як NFV\_варіант1.

При такому варіанті побудови SDN / NFV на комутатор надходять два типи пакетів NFV. Це нові пакети, швидкість надходження яких дорівнює  $\lambda_0$  та пакети, які повертаються на комутатор з контролера (рис.1). Швидкість надходження пакетів другого типу можна обчислити таким чином: оскільки передбачається, що ймовірність появи пакетів, які потребують мережевих функцій, дорівнює  $P_{nfv}$  швидкість надходження пакетів NFV буде дорівнювати  $P_{nfv}\lambda_0$  - це впливає з припущення, що ймовірність появи пакетів, які потребують мережевих функцій, дорівнює  $P_{nfv}$ .

Позначимо ймовірність перенаправлення пакету на контролер з комутатора, як  $P_c$  тоді швидкість пакетів, відправлених контролера від комутатора через пропуску таблиці, дорівнює  $P_c\lambda_0$ . Однак ці два потоки можуть перекивати один одного, тому що деякі пакети NFV можуть надходити поза таблиці. Таким чином, для коректності аналітичної моделі, необхідно відняти ймовірність їх перетину.

Отже, загальна швидкість надходження пакетів, що відправляється від комутатора до контролера, дорівнює

$$(P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv}) \lambda_0.$$

Ця швидкість є швидкістю, надходження пакетів від контролера до комутатора, при цьому передбачається, що буфер контролера не обмежений.

Таким чином, загальна швидкість пакетів, що надходять до комутатора, визначається як:

$$\Lambda_s^{\text{варіант1}} = \lambda_0 + (P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv})\lambda_0 = (1 + P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv}) \lambda_0. \quad (1)$$

Оскільки комутатор представляє собою чергу M / M / 1, середню затримку пакета на комутаторі при NFV\_варіант1 можна отримати, використовуючи  $\Lambda_s^{\text{варіант1}}$  і швидкість обслуговування  $\mu_s$ .

Таким чином, середня затримка на комутаторі в першому варіанті дорівнює:

$$t_s^{\text{варіант1}} =$$

$$= \frac{1}{\mu_s - (1 + P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv}) \lambda_0} \quad (2)$$

Так, як певна частина пакетів, що надходять від контролера, потрапить в модуль VNF, загальна швидкість потоку в VNF дорівнює:

$$\Lambda_f^{\text{варіант1}} = P_{nfv}\lambda_0 \quad (3)$$

Отже, затримка пакета в VNF може бути виражена як:

$$t_f^{\text{варіант1}} = 1/(\mu_f - P_{nfv}\lambda_0), \quad (4)$$

де  $\mu_f$  - швидкість обслуговування в VNF.

Для контролера надходження пакетів відбувається двома способами: певна кількість пакетів потрапляють в контролер з комутатора, так само в чергу контролера потрапляють всі пакети, які залишаються VNF.

Перший випадок аналітично можна описати, як  $(1 + P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv})\lambda_0$ , другий як  $P_{nfv}\lambda_0$ . Об'єднуючи два випадки, загальну швидкість на контролері можна записати таким чином:

$$\Lambda_c^{\text{варіант1}} = P_{nfv}\lambda_0 + (P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv})\lambda_0 = (1 + P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv}) \lambda_0. \quad (5)$$

Як вже зазначалося - контролер має чергу M / M / 1, тому затримку пакета на контролері можна обчислити за формулою:

$$t_c^{\text{варіант1}} = \frac{1}{\mu_c - (2P_{nfv} + P_c + P_{nfv} - P_c * P_{nfv}) \lambda_0}, \quad (6)$$

де  $\mu_c$  - швидкість обслуговування на контролері

Виходячи з варіанту архітектури, що розглядається, кожен пакет NFV повинен відвідати чергу комутатора і контролера двічі, а чергу модуля VNF один раз. Таким чином, можливо обчислити середню затримку для пакетів NFV, використовуючи вирази (2), (4) і (6).

Визначимо аналітично середню затримку для пакетів NFV:

$$t_{\text{загальна}}^{\text{варіант1}} = t_f^{\text{варіант1}} + 2t_c^{\text{варіант1}} + 2t_s^{\text{варіант1}}. \quad (7)$$

Проведемо аналіз варіанту архітектури, яку ми позначили, як NFV\_варіант2.

З рис. 2 видно, що на комутатор надходять два типи пакетів: нові пакети та пакети, які перенаправляються з контролера. Отже, загальна швидкість потоку дорівнює:

$$\Lambda_s^{\text{варіант2}} = \lambda_0 + P_c\lambda_0 = (1 + P_c) \lambda_0. \quad (8)$$

Середня затримка пакетів в комутаторі може бути виражена як:

$$t_s^{\text{варіант2}} = \frac{1}{\mu_s - (1 + P_c) \lambda_0}. \quad (9)$$

Загальна швидкість потоку в VNF дорівнює:

$$\Lambda_f^{\text{варіант2}} = P_{nfv}\lambda_0 \quad (10)$$

Отже, середню затримку пакетів VNF для варіанту 2 можливо записати, як:

$$t_f^{\text{варіант2}} = \frac{1}{\mu_f - Pnfv\lambda_0}. \quad (11)$$

Пакети, які потребують обробки контролером, повинні надсилатися йому з комутатора. Також пакети, що відходять від модуля ланцюжка сервісів, знову потрапляють у чергу контролера. Поєднуючи ці два випадки, загальну швидкість потоку до контролера можна записати як:

$$\Lambda_c^{\text{варіант2}} = Pc\lambda_0 + (Pc * Pnfv)\lambda_0 = (1 + Pnfv)Pc\lambda_0. \quad (12)$$

Оскільки, контролер є системою M / M / 1, затримку пакетів на контролері можна розрахувати як:

$$t_c^{\text{варіант2}} = \frac{1}{\mu_c - (1 + Pnfv)Pc\lambda_0}.$$

Таким чином, можемо обчислити середню затримку для пакетів NFV для варіанту, що розглядається таким чином:

$$\begin{aligned} t_{\text{загальна}}^{\text{варіант2}} &= Pc(2t_s^{\text{варіант2}} + 2t_c^{\text{варіант2}} + t_{sc}^{\text{варіант2}} + \\ &+ t_f^{\text{варіант2}}) + (1 - Pc)(t_f^{\text{варіант2}} + t_s^{\text{варіант2}}) = \\ &= (1 - Pc)t_s^{\text{варіант2}} + 2Pct_c^{\text{варіант2}} + \\ &Pct_{sc}^{\text{варіант2}} + t_f^{\text{варіант2}}; \end{aligned}$$

де  $t_{sc}^{\text{варіант2}}$  – середня затримка пакетів у модулі ланцюжка сервісів.

## Висновки

У роботі представлено моделі для двох архітектур SDN у поєднанні з NFV. Проведено аналіз двох архітектур SDN, в яких NFV знаходиться під контролером або в стороні від нього. Визначені аналітичні моделі для середньої затримки для пакетів NFV

Аналіз затримки пакетів NFV проводився за допомогою моделі M / M / 1.

В наступних роботах планується перевірка викладеного аналізу шляхом проведення імітаційного моделювання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. P.-C. Lin, Y.-D. Lin, C.-Y. Wu, Y.-C. Lai, and Y.-C. Kao, "Balanced service chaining with traffic steering in software defined networks with network function virtualization," IEEE Computer, vol. 49, no. 11, pp. 68–76, November 2016.
2. Y.-D. Lin, P.-C. Lin, C.-H. Yeh, Y.-C. Wang, and Y.-C. Lai, "An extended sdn architecture for network function virtualization with a case study on intrusion prevention," IEEE Network, vol. 29, no. 3, pp. 48–53, May/June 2015.
3. M. Jarschel, S. Oechsner, D. Schlosser, R. Pries, S. Goll, and P. Tran-Gia, "Modeling and performance evaluation of an OpenFlow architecture," in International teletraffic congress, 2011, pp. 1–7.
4. S. Azodolmolky, R. Nejabati, M. Pazouki, P. Wieder, R. Yahyapour, and D. Simeonidou, "An analytical model for software defined networking: A network calculus-based approach," in GLOBECOM, Atlanta, GA, Dec 9-13 2013, pp. 1397–1402.
5. K. Mahmood, A. Chilwan, O. N. Østerbø, and M. Jarschel, "On the modeling of openflow-based sdn: The single node case," arXiv preprint arXiv:1411.4733, 2014.
6. "Modelling of OpenFlow-based software-defined networks: the multiple node case," IET Networks, vol. 4, no. 5, pp. 278–284, 2015.
7. G. Wang, J. Li, and X. Chang, "Modeling and performance analysis of the multiple controllers' approach in software defined networking," in International Symposium on Quality of Service, Portland, OR, June 15-16, 2015, pp. 73–74.
8. B. Xiong, K. Yang, J. Zhao, WeiLi, and K. Li, "Performance evaluation of openflow-based software-defined networks based on queueing model," Computer Networks, vol. 102, pp. 172–185, 2016.
9. Y. Goto, H. Masuyama, B. Ng, W. K. Seah, and Y. Takahashi, "Queueing analysis of software defined network with realistic openflow-based switch model," in IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS), London, UK, September 19-21, 2016, pp. 301–306.
10. W. Miao, G. Min, Y. Wu, H. Wang, and J. Hu, "Performance modelling and analysis of software-defined networking under bursty multimedia traffic," ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM), vol. 12, no. 5s, pp. 77:1–19, 2016.

Received (Надійшла) 11.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

## Analytical simulation of SDN / NFV

Olha Zinchenko, Viktor Vyshnivskiy, Valerii Hladkykh, Serhii Prokopov, Oleksandr Zvenihorodskiy

**Abstract.** Traditional telecommunication networks were designed for the use of specialized hardware devices (routers, Ethernet switches, etc.). These devices were created on the basis of specific hardware and software platforms of individual vendors. The deployment of such network devices has led to long cycles of design and commissioning, and, consequently, to a slowdown in the introduction of new products and services. Maintenance and management of networks of this type has been and remains quite inefficient and expensive. The sharing of SDN and NFV changes the traditional paradigm of network construction, which is how the operator designs, develops, administers the network, and provides products and services to users. Such a paradigm shift can provide many technological and operational benefits. The paradigm shift is aimed at a fundamental rethinking of the cost structure of the operator and the mode of its operational processes. This shift, when used properly, is also able to provide fast and flexible on-demand services development, which increases the operator's competitiveness in the telecommunications and information services market. The article analyzes the advantages of implementing modern technologies for virtualization of network functions. Combining SDNs with NFVs has great advantages, but the problem is their integration. In general, the article is devoted to the study of ways to integrate virtualized network functions and the SDN controller. There are two possible architectures for this integration: the SDN controller interacts with virtualized network functions (VNF) or the switch interacts with VNF. This article provides an analytical description of both options. Thus, the article aims to create a mathematical model for analytical modeling of SDN with NFV and ultimately increase productivity and accelerate the introduction of modern network technologies.

**Keywords:** virtualization of network functions, SDN, queueing systems, OpenFlow.