

## **АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ В СЕТЯХ С ПОДДЕРЖКОЙ ТЕХНОЛОГИИ NFV**

### **Введение**

Стремительно возрастающие потребности пользователей мультисервисных сетей к качеству и разновидностям предоставляемых сервисов влекут за собой необходимость расширения спектра и способов предоставления сервисов со стороны сервис-провайдеров. Широкую популярность приобретают комплексные сервисы, которые подразумевают «бесшовное» совместное функционирование множества атомарных сервисов с целью максимального удовлетворения потребностей пользователей к качеству обслуживания (Quality of Services, QoS). Предоставление подобных сервисов сопряжено с процессами оркестровки, хореографии и последующего мониторинга [1] высокую эффективность которых достаточно трудно обеспечить в традиционных мультисервисных сетях. Одним из решений, позволяющих повысить эффективность процессов управления и предоставления комплексных сервисов, является технология виртуализации сетевых функций (Network Function Virtualization, NFV) [2, 3].

В основе NFV лежит возможность виртуализации множества сервисов, в том числе и тех, которые в традиционных мультисервисных сетях поддерживаются лишь аппаратно. По мере роста популярности NFV возрастает и сложность систем управления ими. Так, некорректное распределение ресурсов в NFV может повлечь за собой нерациональное использование сетевых ресурсов:

- недостаточную загруженность в тех зонах сети, где интенсивность запросов к сервисам невелика, что приводит к неоправданному увеличению финансовых затрат на поддержку как виртуальной среды, так и физической сети, поверх которых она реализована;
- потенциальную перегрузку в тех зонах сети, где интенсивность запросов к сервисам велика, что приводит к возникновению сбоев и отказов в доступе, а следовательно, снижение надежности влечет за собой наложение штрафных санкций.

Для устранения приведенных недостатков применяются механизмы динамического перераспределения сетевых ресурсов или миграции виртуальных узлов. Однако при разработке подобных механизмов возникает ряд трудностей, связанных с неоправданно высокой стоимостью точного расчета интенсивности нагрузки, распределения запросов к виртуальным сетевым ресурсам и уровня популярности предоставляемых сервисов [4, 5].

Множество работ, посвященных разработке методов перераспределения сетевых ресурсов, основано на распределении виртуальных ресурсов, где в качестве целевой функции выступают: минимизация пропускной способности каналов связи [6], повышение уровня доступности путем резервирования ресурсов [7] или дорогостоящей самоорганизации сети [8]. Применение подходов [6 – 8] позволяет достаточно хорошо адаптироваться к перегрузкам сети, однако не позволяет оценить стоимость данной адаптации – стоимость перераспределения ресурсов, что в ряде случаев приводит к неэффективному использованию ресурсов. Таким образом, разработка алгоритма, позволяющего реактивно реагировать на ухудшения качества сервисов в мультисервисных сетях с поддержкой технологии NFV, а также учитывать стоимость процесса перераспределения сетевых ресурсов, является актуальной задачей.

### **Алгоритм перераспределения сетевых ресурсов, основанный на учете стоимости**

В соответствии с ETSI [9, 10], архитектура мультисервисной сети с поддержкой функций виртуализации состоит из трех ключевых компонентов: физических ресурсов, виртуальных ресурсов (узлов) и платформы управления и оркестровки сервисов (NFV MANO).

Структурная схема архитектуры мультисервисной сети с поддержкой функций виртуализации приведена на рис. 1.

За корректное взаимодействие между физическими и виртуальными компонентами сетевой инфраструктуры отвечает компонент MANO.

Физические ресурсы NFVI включают в себя серверное оборудование, оборудование коммутации и маршрутизации, системы хранения данных и каналы связи. Слаженное взаимодействие данных компонентов обеспечивает корректную передачу данных от окончного пользователя к вычислительным элементам, и наоборот.

Уровень виртуализации представляет собой множество абстракций: виртуальные машины с разными операционными системами (ОС) и приложениями и центры хранения данных. Именно они обеспечивают формирование и предоставление полного спектра услуг окончным пользователям.

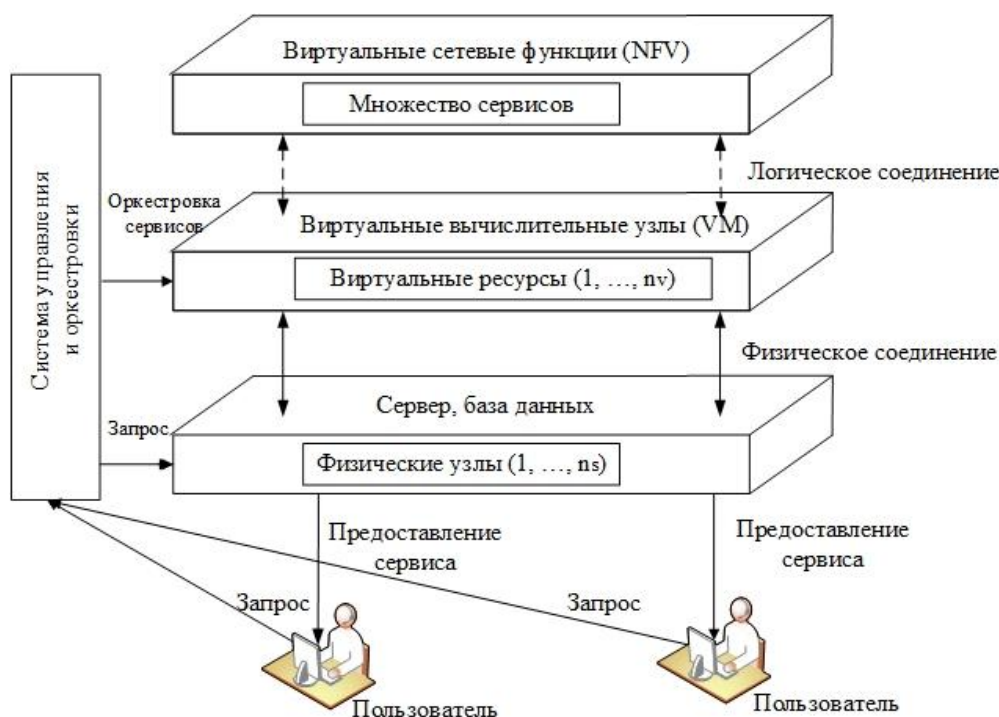


Рис. 1

В процессе предоставления сервисов может потребоваться выделение дополнительных ресурсов – как виртуальных, так и физических. При этом нехватка физических ресурсов приводит к ограничению виртуальных ресурсов и, как следствие, деградации качества сервисов, запущенных на виртуальных узлах. С целью поддержки требуемого уровня качества применяются механизмы миграции [4 – 8], нацеленные на повышение уровня производительности путем переноса услуги на наименее загруженный физический узел сети [7], минимизацию требуемой пропускной способности каналов [6] во время миграции, повышение уровня доступности путем резервирования ресурсов [8]. Существующие алгоритмы перераспределения сетевых ресурсов обладают общим существенным недостатком – принятие управляющего решения на основе статистических данных, что не позволяет оценить текущее взаимодействие сетевых ресурсов.

С целью описания взаимодействия компонентов сети при разработке алгоритма миграции предложено использовать модельный подход [11]. Физическая инфраструктура мультисервисной сети представлена ориентированным графом вида

$$G_s = (N_s, E_s), \quad (1)$$

где  $N_s$  – множество физических узлов сети:  $\{n_{s1}, n_{s2}, n_{s3}, \dots \in N_s\}$ ,  $E_s$  – множество дуг, обеспечивающих связи между узлами  $\{l_{s1}, l_{s2}, l_{s3}, \dots \in E_s\}$ .

Виртуальная сетевая архитектура, накладываемая на физические сетевые ресурсы по аналогии с описанием физической инфраструктуры, также может быть представлена ориентированным графом (рис. 1)

$$G_v = (N_v, E_v), \quad (2)$$

где  $N_v$  – множество виртуальных узлов, реализующих требуемые сервисы:  $\{n_{v1}, n_{v2}, n_{v3}, \dots \in N_v\}$ ,  $E_v$  – множество дуг, отображающих взаимодействие между узлами,  $\{l_{v1}, l_{v2}, l_{v3}, \dots \in E_v\}$ . Каждый виртуальный узел  $n_{v_s}, \{v \in N_v\}$  характеризуется уровнем производительности,  $a_{n_v}(t)$ , а дуга – требуемой пропускной способностью,  $a_l(t)$ .

В соответствии с рекомендациями RFC 7149 [12], IETF P1903.3 [13], ETSI GS NFV 002 [14] с целью комплексной оценки показателей качества обслуживания в мультисервисных сетях с поддержкой NFV предложено проводить анализ и последующую оценку следующих показателей:

- стоимость предоставления сервиса  $c(s)$ ;
- время отклика в процессе предоставления сервиса  $t(s)$ ;
- надежность  $r(s)$ ;
- доступность  $a(s)$ .

В целом, значение показателей  $t(s)$ ,  $r(s)$ ,  $a(s)$  может быть охарактеризовано комплексным показателем, значение которого зависит как от производительности физического и виртуального узлов, а также пропускных способностей физического и виртуального каналов связи, задействованных в предоставлении услуги:

$$\begin{aligned} p_s(t) &= p_{n_s}(t) + p_{v_s}(t); \\ Th_s(t) &= \min(Th_{l_s}(t), Th_{l_v}(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $p_{n_s}(t)$  – производительность физического узла в момент времени  $t$ ;  $p_{v_s}(t)$  – производительность виртуального узла в момент времени  $t$ . Производительность виртуального узла всегда ограничена производительностью физического узла, на котором он развернут:  $p_{v_s}(t) < p_{n_s}(t)$ ;  $Th_{l_s}(t)$  – доступная пропускная способность физических канальных ресурсов в момент времени  $t$ ;  $Th_{l_v}(t)$  – доступная пропускная способность виртуальных канальных ресурсов в момент времени  $t$ , пропускная способность виртуального канала связи не превышает пропускную способность  $Th_{l_s}(t)$ :  $Th_{l_v}(t) < Th_{l_s}(t)$ ,

В случае, если физической узел не способен обеспечить производительность, необходимую для эффективного функционирования виртуальных ресурсов, а следовательно, и предоставления сервисов с требуемым уровнем качества, в сетях с поддержкой виртуализации сетевых функций активируются механизмы перераспределения ресурсов в сети.

Перераспределение ресурсов осуществляется за счет миграции виртуального узла на другой, менее загруженный, физический узел сети. Предлагаемый алгоритм миграции наряду с анализом текущей производительности физических узлов позволяет также учитывать стоимость миграции. Результатом функционирования алгоритма является набор физических узлов с требуемым уровнем производительности, стоимость миграции на которые является наименьшей.

Целевая функция  $Q()$  может быть представлена следующим образом:

$$Q(p_s, C_{tot}(n_v)) \rightarrow \min_{CP_\alpha}, \quad (4)$$

где  $p_s$  – суммарная производительность,  $c_s$  – стоимость миграции,  $CP_\alpha$  – политика управления сетевой нагрузкой.

В данном случае задачу оптимизации можно свести к задаче поиска минимального значения суммарной стоимости перераспределения сетевых ресурсов  $\min(C_{tot}(n_v))$

Суммарная стоимость перераспределения ресурсов включает в себя следующие составляющие:

- стоимость «разворачивания» узла на новом физическом устройстве, которая включает стоимость простоя сервисов во время выбора альтернативных физических узлов и подготовку к разворачиванию нового виртуального узла,  $C_{reloc}(n_v)$ ;

- стоимость поддержки соединения между альтернативным физическим узлом и деградирующим узлом, которая включает выделение требуемой пропускной способности канала и поддержку требуемого уровня производительности альтернативного физического узла,  $C_{mig}(n_v)$  и может быть задана следующим выражением:

$$C_{tot}(n_v) = C_{suspend}(n_v) + p_{n_s^r}(t) * C(M_{N_v^r}(n^r)) + \sum_{l_s} \sum_{l_v \in M_{L_v^r}} Th_{l_v}(t) * C(M_{L_v^r}(l^r)), \quad (5)$$

где  $p_{n_s^r}(t)$  – альтернативный физический узел, соответствующий требованиям, выдвигаемым к производительности,  $C(M_{N_v^r}(n^r))$  – стоимость размещения виртуального узла на выбранном физическом узле,  $Th_{l_v}$  – пропускная способность канала передачи данных между выбранным физическим узлом и деградирующим физическим узлом, на котором размещен виртуальный узел;  $C(M_{L_v^r}(l^r))$  – стоимость миграции виртуального узла.

Минимально требуемая пропускная способность, выделяемая для переноса виртуального узла на альтернативный физический узел, может быть определена следующим образом:

$$\min Th_{l_v} = \frac{|n_v|_{l_s \in p_{mig}(n_v^r)}}{\max T_{QoS}}, \quad (6)$$

где  $|n_v|_{l_s \in p_{mig}(n_v^r)}$  – размер переносимого виртуального узла (Мб),  $\max T_{QoS}$  – максимальное время доступа к услуге без наложения штрафных санкций.

В этом случае стоимость миграции включает в себя стоимость выделения / резервирования пропускной способности, необходимой для миграции:

$$C_{mig}(n_v) = C(l_s) * \sum_{l_s \in p_{mig}(n_v^r)} \min Th_{l_v}, \quad (7)$$

где  $l_s \in p_{mig}(n_v^r)$  – маршрут, используемый для миграции виртуального узла на альтернативный физический узел.

Суммарная стоимость миграции включает в себя стоимость перераспределения ресурсов и непосредственно стоимость миграции:

$$C_{tot}(n_v) = C_{reloc}(n_v) + C_{mig}(n_v). \quad (8)$$

Ключевой задачей предлагаемого алгоритма перераспределения ресурсов является поиск такого физического узла и маршрута  $l_s \in p_{mig}(n_v^r)$  миграции, при котором суммарная составляющая стоимости перераспределения сводятся к минимуму  $C_{tot}(n_v) \rightarrow \min$

Перераспределение ресурсов с целью обеспечения минимальной общей стоимости предложено выполнять в несколько этапов:

- определение набора виртуальных узлов, миграция которых является необходимой. Как отмечено ранее, в качестве таких узлов выступают узлы, нагрузка на которые постоянно увеличивается, а производительность, с увеличением нагрузки, уменьшается (как правило, наблюдается снижение физического узла);
- определение набора физических узлов, наиболее подходящих для перемещения, которые размещены в одной зоне с деградирующим сервисом. В качестве таких узлов выступают наиболее терпимые к сбоям и перегрузкам;
- формирование маршрутов, позволяющих обеспечить наименьшую стоимость и окончательный выбор узлов для миграции. алгоритм должен эффективно отображать узлы и ссылки для достижения минимальной цели перераспределения и миграции;
- расчет  $C_{reloc}(n_v)$  и  $C_{mig}(n_v)$ .

Псевдокод, описывающий поведение разработанного алгоритма, может быть представлен следующим образом:

```

Reallocate(nv, min(Ctot(nv)))
ReallocationResult ← failure
Remap Ctot(nv) ← ∞
Search nearnv
if nearnv is less than required then
  for all ns ∈ near nv(degrad)
    do map nv in ns
    for all lv ∈ Snv do
      re-map virtual node to physical node
    end for
  if Ns mapping succeeds then
    ReallocationResult success
  if Creloc(Ns) < Creloc(Ns+i) then
    do route nv(degrad) in Ns
    for all lv ∈ Es ∩ Ev do
      do route nv in ns
      for all lv ∈ Snv do
        route virtual link ls onto a substrate path α using shortest path algorithm
      end if
    end if
  end if
end for
if ReallocationResult = Success then
  Add Creloc(nv) + Cmig(nv) to Ctot(nv)
end if
end if
return ReallocationResult

```

### Оценка эффективности предлагаемого метода динамического распределения пропускной способности каналов связи

Для оценки эффективности предлагаемого алгоритма балансировки нагрузки для сетей с поддержкой технологии NFV использовался сетевой эмулятор mininet [15]. Топология экспериментального фрагмента сети приведена на рис. 2.

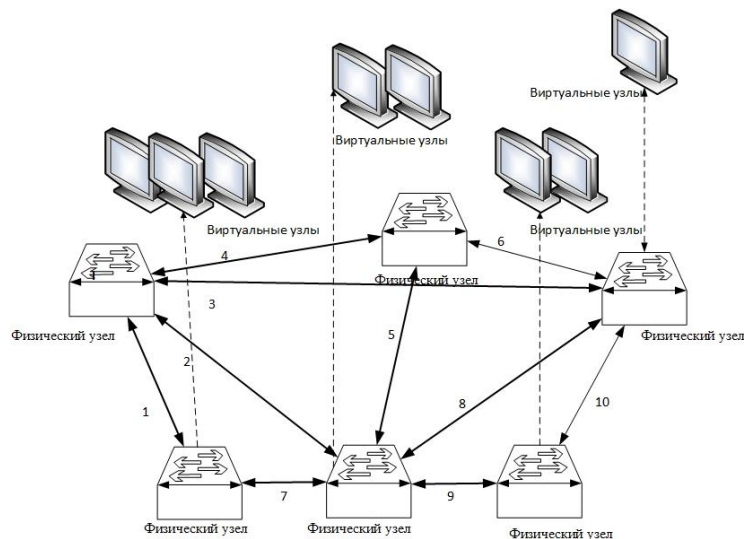


Рис. 2

В процессе эксперимента применялись алгоритмы перераспределения виртуальных ресурсов сети, которые имеют достаточный уровень апробаций: RSforEVN [8] и DVNMA\_NS [16], а также предложенный в работе алгоритм.

Для оценки результатов эксперимента предложено использовать следующие метрики:

- стоимость «разворачивания» узла на новом физическом устройстве  $C_{reloc}(n_v)$ ;
- стоимость миграции  $C_{mig}(n_v)$ .

Входными данными в процессе проведения эксперимента выступали:

- пороговое значение производительности физического узла – 80 %;
- пороговое значение пропускной способности – 1,2 Мб/с;
- пороговое значение времени отклика – 50 мс;
- объем данных при миграции – 780 Мб.

Данные, полученные в результате эксперимента, приведены в таблице.

Результирующее значение стоимости перераспределения ресурсов

Стоимость «разворачивания» узла на новом физическом устройстве $C_{reloc}(n_v)$		
RSforEVN	DVNMA_NS	Разработанный алгоритм
77	450	97
Стоимость миграции $C_{mig}(n_v)$		
RSforEVN	DVNMA_NS	Разработанный алгоритм
126	457	115

Как показывают результаты эксперимента, стоимость планового перераспределения ресурсов разработанного алгоритма значительно не уступает стоимости RSforEVN, но в 4,5 раза меньше стоимости DVNMA\_NS, а при оценке стоимости миграции – является минимальной. Основным преимуществом разработанного алгоритма является выбор ближайших альтернативных физических узлов, производительность которых не превышает заданную границу, что позволяет существенно сократить стоимость миграции.

### Выводы

В работе предложен алгоритм перераспределения сетевых ресурсов в мультисервисных сетях с поддержкой технологии NFV, позволяющий учитывать стоимость процесса перерас-

предела сетевых ресурсов, основной особенностью которого является формирование множества альтернативных физических узлов, размещенных в одной или ближайшей зоне с деградирующим сервисом. Приведена математическая модель оценки суммарной стоимости перераспределения (5) – (8). По результатам математического моделирования проведен эксперимент, который показал, что выигрыш суммарной стоимости от использования разработанного алгоритма по сравнению с алгоритмом DVNMA\_NS возрастает в 4,5 раза.

**Список литературы.** 1. *Agushaka, J. O.* Effect of Weighting Scheme to QoS Properties in Web Service Discovery/Agushaka J.O., Lawal M. M., Bagiwa, A. M. and Abdullahi B. F // International Journal of Computer Science and Information Security. – Vol. 7. – No. 3 March 2010. – P.92-100. 2. *ETSI Industry Specification Group (ISG).* NFV, ETSI GS NFV 002 V1.2.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework [online]. Available at: <http://www.etsi.org/deliver/etsigs/NFV/001099/002/01.02.0160/gsnfv002v010201p.pdf>, December 2014. 3. *ETSI Industry Specification Group (ISG).* NFV, ETSI GS NFV-MAN 001 V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration, <http://www.etsi.org/deliver/etsigs/NFV-MAN/001099/001/01.01.0160/gsnfv-man001v010101p.pdf>, December 2014. 4. *Tran, P.N., Timm-Giel, A.* Reconfiguration of virtual network mapping considering service disruption. In: (ICC), 2013. P.160-169. 5. *Lu, J., Turner, M.* Efficient Mapping of Virtual Networks onto a Shared Substrate. Tech. rept. Washington University in St. Louis, Jonathan. 2006. 152 p. 6. *Zhang, S., Sheng, Q. and all.* Virtual Network Embedding with Opportunistic Resource Sharing. Parallel and Distributed Systems // IEEE Transactions. – 2014. – Vol. 25(3). – P. 816–827. 7. *Zhani, M.F., Zhang, Q., Simon, G.* VDC Planner: Dynamic migration-aware Virtual Data Center embedding for clouds // Integrated Network Management (IM 2013), 2013 IFIP/IEEE International Symposium on. 2014. P.112–118. 8. *Jmila, H., Houidi, I., Zeglache, D.* RSforVNE: Node Reallocation Algorithm for Virtual Networks Adaptation // 19th IEEE Symposium on Computers and Communications (IEEE ISCC 2014). 9. NFV.Network Operator Perspectives on Industry Progress. Online. Available at: [https://portal.etsi.org/NFV/NFV\\_White\\_Paper2.pdf](https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper2.pdf) 10. Infonetics Research, Inc. SDN and NFV Strategies: Global Service Provider Survey [Электронный ресурс]. 2014. – 39 с. Режим доступа: <http://alu.us.neolane.net/res/img/286758382c7e061c52883e873cee02e6.pdf> 11. *Поповский, В. В.* Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах : ученик / В. В. Поповский, В. Ф. Олейник. – Харьков : СМИТ, 2011. – 362 с. 12. *ITU-T Recommendation E.802.* Series E: Overall network operation, telephone service, service operations and human factors – Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. Geneva: International Telecommunications Union. – 2007. 13. *P1903.3* – Standard for Self-Organizing Management Protocols of Next Generation Service Overlay Network (NGSON) 14. *GS NFV 002* Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework. 15. *Mininet:* An Instant Virtual Network on your Laptop (or other PC) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mininet.org/> 16. *Sun G., Yu H., Anand V.* A cost efficient framework and algorithm for embedding dynamic virtual network requests // *Future Generation Comp. Syst.* – 2013. – Vol. 29(1). – P.1265–1277.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 23.10.2017