

Мазур Д.С.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Тіменко А.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Шкарупило В.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Кудерметов Р.К.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ПІДХІД ДО РЕАЛІЗАЦІЇ OPENFLOW-СУМІСНИХ КОМУТАТОРІВ НА ОСНОВІ RASPBERRY PI

Сьогодні концепція Інтернету речей набуває все більшого поширення у різних сферах застосування. Це пов'язано, зокрема, з інформатизацією і ускладненням виробничих і організаційних процесів, що охоплюють вирішення питань автоматизації, зменшення витрат тощо. Ключова ідея в основі Інтернету речей – «розумні» пристрої взаємодіють між собою без участі людини. Це досягається через введення концепцій «контролера» і OpenFlow-сумісного комутатора, де OpenFlow – протокол взаємодії контролера і комутаторів. Істотним недоліком названих комутаторів є їхня відносно висока вартість. Такий стан речей не завжди є прийнятним для певних сценаріїв застосування. Відповідними прикладами можуть слугувати навчальні і тренувальні сценарії, коли застосування тих чи інших пристроїв унеможлиблюється з фінансової причини. Рішення полягає у використанні як програмно-апаратної основи таких комутаторів поширених і доступних платформ. Прикладом відповідної платформи є Raspberry Pi. Завданням роботи є експериментальне дослідження доцільності застосування програмно-апаратної платформи Raspberry Pi як основи для реалізації OpenFlow-сумісного комутатора, призначеного для функціонування в навчальних і тренувальних сценаріях, з позиції доступності широкому загалу, зручності використання та низької вартості реалізації. Експериментальні дослідження проведено на основі платформи мінімальної конфігурації Raspberry Pi Zero і базової платформи Raspberry Pi 3 Model B. Як програмний складник задіяно відкриту платформу Open vSwitch – віртуальне середовище, що реалізує функціонал комутатора. Одержані результати показали обґрунтованість використання названих платформ як основи для реалізації OpenFlow-сумісного комутатора, призначеного для функціонування в навчальних і тренувальних сценаріях, з позиції доступності широкому загалу, зручності використання та доступної вартості реалізації.

Ключові слова: OpenFlow, Raspberry Pi, Інтернет речей, комутатор, програмно-конфігурована мережа.

Постановка проблеми. Сучасний стан розвитку інформаційно-комунікаційних технологій можна охарактеризувати так: усе більшого поширення набуває концепція Інтернету речей (IoT, Internet of Things). Згідно з цією концепцією, велика кількість (тисячі, мільйони) «розумних» пристроїв (мобільні засоби зв'язку, побутові пристрої тощо) взаємодіють між собою без участі людини з метою автоматизації тих чи інших бізнес-процесів [1]. Прикладами відповідних предметних галузей можуть слугувати такі сценарії застосування: «розумна оселя», «розумне місто» тощо. Метою організації такої взаємодії між пристроями можуть

бути, зокрема, пришвидшення тих чи інших бізнес-процесів, зниження супутніх цим процесам матеріально-технічних витрат, наприклад витрат енергії. Створення відповідних систем потребує переосмислення ідеології мереж у їхній основі. У цьому контексті має місце концепція програмно-конфігурованих мереж (SDN, Software-defined Networking) [2]. Ключовими перевагами від реалізації систем згідно з названою концепцією є такі позиції: можливість централізованого управління компонентами мережі, програмованість, реконфігурованість. Озвучені позиції є взаємопов'язаними. Їхня реалізація стала можливою завдяки виокремленню двох

архітектурних рівнів SDN-мереж – рівня управління (Control Plane) і рівня передачі даних (Data Plane). При цьому оперують поняттями «контролера», комутатора і вузла, що є основними типами компонентів програмно-конфігурованих мереж. Контролер відіграє роль засобу централізованого координування комутаторів.

Взаємодія між контролером і комутатором здійснюється згідно зі спеціально розробленим протоколом – OpenFlow [3]. Цей протокол постійно вдосконалюється і оновлюється консорціумом ONF (Open Networking Foundation). Одна з останніх версій – 1.5.1 [4]. Щоб комутатор можна було включити до складу SDN-мережі, він має підтримувати принаймні початкову версію протоколу OpenFlow. Представниками відповідного обладнання нині є, зокрема, продукція NoviFlow [5], Centec [6] тощо. Попри високі технічні та експлуатаційні характеристики такого обладнання, у нього є вагомий недолік – вартість придбання і супроводження. У результаті цього для тих чи інших сценаріїв застосування актуальності набуває проблема пошуку альтернативних рішень, зокрема власної реалізації. Особливої уваги, на нашу думку, при цьому заслуговують навчальні і тренувальні сценарії застосування OpenFlow-сумісних комутаторів, коли використання спеціалізованого обладнання не є за тих чи інших обставин можливим або економічно обґрунтованим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявні рішення у напрямі створення і застосування OpenFlow-сумісних комутаторів у навчальних і тренувальних сценаріях умовно можна розділити на дві групи – такі, що передбачають використання засобів емуляції, і такі, що ґрунтуються на використанні уніфікованих платформ. У першому випадку поширення набуло використання емулятора Mininet [7, с. 6; 8, с. 172]. Також має місце використання емуляторів EstiNet [9], ns-3 [10], OpenNet [11], що, однак, є менш поширеними. Використання емуляторів при цьому розглядається як доповнювальний засіб. Як представника другої групи можна навести рішення на основі платформи NetFPGA – відкритої платформи, призначеної для дослідницьких цілей [12]. Відповідне рішення характеризується пропусковою спроможністю близько 1 Гб/с і було протестоване на базі кампусу Стенфордського університету. Попри задовільні технічні характеристики, адаптація таких OpenFlow-сумісних комутаторів для навчальних і тренувальних цілей потребує високого рівня вузькоспеціалізованих знань і вмінь, що є, на нашу думку, суттєвим недоліком.

У контексті зниження вартості реалізації доречним убачається використання поширеної програмно-апаратної платформи Raspberry Pi як основи для OpenFlow-сумісного комутатора [13]. Альтернативою може вбачатися платформа ZodiacFX, яка, однак, майже втричі дорожча [14]. Ба більше, конкурентоспроможність платформи Raspberry Pi як альтернативи NetFPGA з позицій продуктивності (співставна) і вартості реалізації (рішення на базі Raspberry Pi має в десятки разів меншу вартість) вже була показана раніше [15, с. 759–761]. На жаль, ці дослідження не показують, яка саме платформа Raspberry Pi використовується і як вибір тієї чи іншої платформи впливає на продуктивність результуючої системи. Пошуку відповіді на це питання і присвячена робота.

Отже, результати проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій демонструють, на нашу думку, актуальність створення OpenFlow-сумісних комутаторів, використання яких вирізнялося би такими перевагами: доступність широкому загалу, що відображає саму концептуальну ідею Інтернету речей; зручність використання; доступна вартість реалізації.

Постановка завдання. Завданням роботи є експериментальне дослідження доцільності використання програмно-апаратної платформи Raspberry Pi як основи для реалізації OpenFlow-сумісного комутатора, призначеного для використання в навчальних і тренувальних сценаріях, з позицій доступності широкому загалу, зручності використання та доступної вартості реалізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Підхід до проведення експериментальних досліджень згідно з поставленим завданням полягає в такому. Як тестові платформи використовуються Raspberry Pi Zero (мінімальна конфігурація, що передбачає найпоміркованіші витрати) (рис. 1) [16], а також Raspberry Pi 3 Model B (базова конфігурація) (рис. 2) [17].



Рис. 1. Тестовий стенд на базі платформи Raspberry Pi Zero

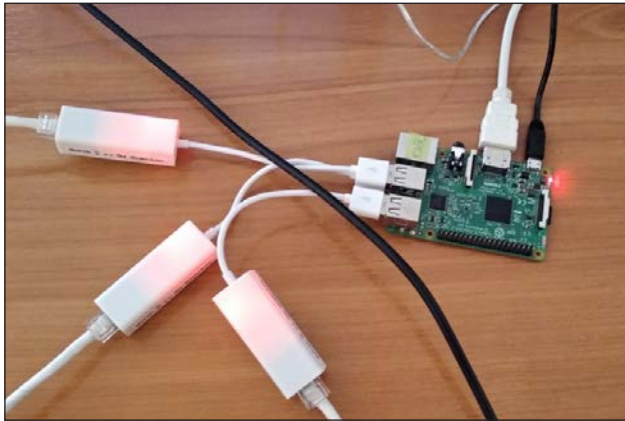


Рис. 2. Тестовий стенд на базі платформи Raspberry Pi 3 Model B

Варто зазначити, що у випадку платформи Raspberry Pi Zero підключення вузлів здійснювалося через спеціалізований пристрій – OTG-адаптер (One-to-Go), оскільки сама платформа має лише один вільний Micro-USB OTG-порт (рис. 1). Передбачається, що таке обмеження негативним чином відобразиться на продуктивності результуючого OpenFlow-сумісного комутатора на її основі.

Як програмний складник використано віртуальне середовище Open vSwitch [18].

Результати проведених експериментальних досліджень подано в табл. 1–3. Для замірювання продуктивності використано команду «iperf». У таблицях подано середні значення 10 замірів.

У табл. 1 показано залежність швидкості передачі даних від розміру пакетів і інтервалу їх слідування. З табл. 1 видно, що швидкість передачі даних для трьох підключень істотно знизилась.

Систему з двома підключеними вузлами було зібрано також на основі платформи Raspberry Pi Zero (табл. 2) [16]. Це дасть змогу, зокрема, оцінити вплив використання OTG-адаптера у схемі підключення.

Результати, подані в табл. 2, дещо нижчі за такі, наведені в табл. 1, оскільки підключення вузлів здійснюється через OTG (One-to-Go) USB-пристрій, а не напряму до портів Raspberry Pi – маємо лише один вільний Micro USB OTG-порт (інший задіяно для живлення пристрою).

Узагальнені результати подано в табл. 3.

З табл. 3 видно, що для випадку трьох підключених вузлів швидкодія результуючої системи є суттєво нижчою – у 2,43–2,51 рази. Ба більше, порівнюючи швидкість обміну даними між вузлами програмно-конфігурованої мережі через комутатори на основі платформ Raspberry Pi 3 Model B і Raspberry Pi Zero, можна зазначити суттєву перевагу першого рішення – 44–50%. Це переважно зумовлено таким фактором: наявністю лише одного вільного USB-порту в більш економічній платформі Raspberry Pi Zero і, як наслідок, потребою використання USB OTG-порту – для підключення вузлів мережі.

Проведені результати тестування показали придатність використання платформ Raspberry Pi 3 Model B і Raspberry Pi Zero як основи для реалізації OpenFlow-сумісних комутаторів. Істотним недоліком при цьому є відносно низька пропускна спроможність відповідних каналів передачі даних, зумовлена апаратними обмеженнями платформи Raspberry Pi. Як вагома перевага є істотно нижча вартість таких рішень, що є суттєвим аргументом

Таблиця 1

Швидкодія тестового стенду на платформі Raspberry Pi 3 Model B з двома і трьома підключеними вузлами (комп'ютерами)

Інтервал, с	Два підключення		Три підключення	
	Розмір пакету, КБ	Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Розмір пакету, КБ	Швидкість передачі даних, Мбіт/с
0–1	640	5,20	252	2,06
1–2	384	3,17	189	1,55
2–3	512	4,19	63	0,52
3–4	384	3,14	126	1,03
4–5	512	4,20	252	2,06
5–6	384	3,14	189	1,55
6–7	512	4,20	189	1,55
7–8	384	3,14	189	1,55
8–9	512	4,19	189	1,55
9–10	384	3,15	189	1,55

Таблиця 2

Швидкодія тестового стенду на платформі Raspberry Pi Zero з двома підключеними вузлами (комп'ютерами)

Інтервал, с	Розмір пакету, КБ	Швидкість передачі даних, Мбіт/с
0–1	512	4,19
1–2	256	2,10
2–3	256	2,10
3–4	384	3,15
4–5	256	2,10
5–6	256	2,10
6–7	256	2,10
7–8	384	3,14
8–9	256	2,10
9–10	384	3,15

на користь використання названої платформи для реалізації OpenFlow-сумісних комутаторів, призначених для навчальних і тренувальних цілей, зокрема для підготовки спеціалістів у сфері програмно-конфігурованих мереж.

Висновки. Результати проведених експериментальних досліджень показали, що використання платформи Raspberry Pi, зокрема її варіацій Raspberry Pi 3 Model B і Raspberry Pi Zero, є дієвим рішенням із позиції зменшення матеріальних

витрат на OpenFlow-сумісні комутатори. Такий підхід охарактеризовано як прийнятний із позиції навчальних сценаріїв застосування, зокрема під час підготовки кваліфікованих спеціалістів у напрямі роботи з програмно-конфігурованими мережами.

Експериментальним шляхом продемонстровано, що використання платформи Raspberry Pi 3 Model B замість альтернативи Raspberry Pi Zero як основи OpenFlow-сумісного комутатора супроводжується такими перевагами:

– більшою швидкістю передачі даних між підключеними до комутатора вузлами – на 44–50%. Це зумовлено потребою залучення спеціалізованого USB OTG-пристрою, оскільки платформа Raspberry Pi Zero має лише один вільний USB-порт;

– більшою кількістю потенційно можливих підключень вузлів до комутатора на основі платформи Raspberry Pi 3 Model B. У розпорядженні – чотири вільних порти.

Отже, проведені експериментальні дослідження підтвердили доцільність використання програмно-апаратної платформи Raspberry Pi як основи для реалізації OpenFlow-сумісного комутатора, призначеного для застосування в навчальних і тренувальних сценаріях, з позицій доступності широкому загалу, зручності і використання, доступної вартості реалізації.

Таблиця 3

Узагальнені результати для платформ Raspberry Pi 3 Model B і Raspberry Pi Zero

К-ть підключень	Передано, МБ		Швидкість передачі даних, Мбіт/с	
	Відправник	Одержувач	Відправник	Одержувач
Платформа Raspberry Pi 3 Model B				
2	4,50	4,35	3,77	3,65
3	1,78	1,78	1,5	1,5
Raspberry Pi Zero				
2	3,12	2,89	2,62	2,43

Список літератури:

1. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: a survey. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54. No. 15. P. 2787–2805.
2. Feamster N., Rexford J., Zegura E. The road to SDN: an intellectual history of programmable networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2014. Vol. 44. No. 2. P. 87–98.
3. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008. Vol. 38 No. 2. P. 69–74.
4. OpenFlow Switch Specification, Version 1.5.1 (Protocol version 0x06). URL: <https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.1.pdf> (дата звернення: 05.11.2019).
5. OpenFlow Switches. URL: <https://shop.stordis.com/en/switches/openflow-switches> (дата звернення: 05.11.2019).
6. SDN/OpenFlow Switch. URL: <http://www.centecnetworks.com/en/SolutionList.asp?ID=41> (дата звернення: 05.11.2019).

7. Шкарупило В.В., Кудерметов Р.К., Мазур Д.С., Скарга-Бандурова І.С., Шумова Л.О., Великжанін А.Ю., Харченко В.С., Узун Д.Д., Узун Ю.О., Годованюк П.А. Програмно-конфігуровані мережі та Інтернет речей : практикум / за ред. Р.К. Кудерметова. МОН України, Запорізький національний технічний університет, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2019. 129 с.
8. Shkarupylo V.V. SDN programming and simulation of SDN composing, configuring and scaling. Internet of Things for Industry and Human Application. In Volumes 1–3. Vol. 2. *Modelling and Development* / V.S. Kharchenko (ed.). Ministry of Education and Science of Ukraine, National Aerospace University KhAI, 2019. P. 165–193.
9. Wang S-Y. Comparison of SDN OpenFlow network simulator and emulators: EstiNet vs. Mininet. *Computers and Communication* : 2014 IEEE Symposium (Funchal, Portugal, 23–26 Jun. 2014). Funchal, 2014. P. 1–6.
10. Ivey J., Yang H., Zhang C., Riley G. Comparing a scalable SDN simulation framework built on ns-3 and DCE with existing SDN simulators and emulators. *Principles of Advanced Discrete Simulation* : 2016 annual ACM Conference (Banff, Alberta, Canada, 15–18 May 2016). 2016. P. 153–164.
11. Chan M.-C., Chen C., Huang J.-X., Kuo T., Yen L.-H., Tseng C.-C. OpenNet: A simulator for software-defined wireless local area network. *Wireless Communications and Networking* : 2014 IEEE Conference (Istanbul, Turkey, 6–9 April 2014). P. 3333–3337.
12. Naous J., Erickson D., Covington G.A., Appenzeller G., McKeown N. Implementing an OpenFlow switch on the NetFPGA platform. *Architectures for Networking and Communications Systems* : 4th ACM/IEEE Symposium (San Jose, California, 06–07 Nov. 2008). San Jose, 2008. P. 1–9.
13. Maksimović M., Vujović V., Davidović N., Milošević V., Perišić B. Raspberry Pi as Internet of Things hardware: performances and constraints. *Electrical, Electronic and Computing Engineering* : 1st International Conference (Vrnjačka Banja, Serbia, 2–5 June 2014). Vrnjačka Banja, 2014. P. 1–6.
14. Nazir F., Humayun Q., Ahmad R. B., Elias S.J. Software-defined Network testbed using ZodiacFX a hardware switch for OpenFlow. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*. 2017. Vol. 4. No. 14. P. 1–6.
15. Kim H., Kim J., Ko Y.-B. Developing a cost-effective OpenFlow testbed for small-scale Software Defined Networking. *Advanced Communication Technology* : 16th International Conference (Pyeongchang, South Korea, 16–19 Feb. 2014). Pyeongchang, 2014. P. 758–761.
16. Raspberry Pi Zero. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-zero/> (дата звернення: 05.11.2019).
17. Raspberry Pi 3 Model B. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-3-model-b/> (дата звернення: 05.11.2019).
18. Pfaff B., Pettit J., Koponen T., Jackson E., Zhou A., Rajahalme J., Gross J., Wang A., Stringer J., Shelar P., Amidon K., Casado M. The Design and Implementation of Open vSwitch. *Networked Systems Design and Implementation* : 12th USENIX Symposium (Oakland, CA, USA, 4–6 May 2015). Oakland, 2015. P. 117-130.

Mazur D.S., Timenko A.V., Shkarupylo V.V., Kudermetov R.K. APPROACH TO OPENFLOW-COMPATIBLE SWITCHES IMPLEMENTATION ON THE BASIS OF RASPBERRY PI

Nowadays, the concept of the Internet of Things acquires the constantly growing popularity in diverse spheres of implementation. It depends, in particular, on informatization and complication of production and organizational processes, encompassing resolving the tasks of automation, costs reduction etc. The main idea of the Internet of Things is as follows: “smart” devices communicate to each other without the participation of human being. It is achieved through the introduction of the concepts of “controller” and OpenFlow-compatible switch, where the OpenFlow is the communication protocol between the controller and switches. The significant drawback of these switches is their comparatively high cost. This position is not always acceptable for certain usage scenarios. Corresponding examples are educational and training scenarios, when the usage of certain devices can be hindered by the financial aspect. The solution can be found in utilization of open platforms, e.g., Raspberry Pi, as the basis for OpenFlow-compatible switches. The task resolved in this paper – experimentally prove the expediency of Raspberry Pi platform usage as the basis of OpenFlow-compatible switch to be involved in educational and training scenarios, matching the requirements of availability, easiness of use and low implementation cost. The experiments have been conducted on the basis of Raspberry Pi Zero platform (minimal configuration) and Raspberry Pi 3 Model B platform (typical configuration). An Open vSwitch software has been used as virtualization environment. The results obtained have proved the expediency of aforementioned platforms utilization as the basis of OpenFlow-compatible switch, devoted to be applied for educational and training purposes and meeting the requirements of availability, easiness of use and affordable implementation cost.

Key words: OpenFlow, Raspberry Pi, Internet of Things, switch, software-defined network.