**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**

FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY

# DIPLOMOVÁ PRÁCA

ZDENKO HOLEŠA

## Technológia softvérovo-definovaných sietí a výučba KIS

Vedúci práce: doc. Ing. Pavel Segeč, PhD.

Registračné číslo: 355/2015

Žilina, 2016

# Úvod

Softvérovo-definované siete (SDN) sú relatívne nový prístup, ktorý mení spôsob ako dizajnovať, budovať a prevádzkovať siete, čo prináša významné technologické a finančné benefity. S technológiou SDN už siete nie sú uzatvorené, proprietárne a náročné na programovanie. Prostredníctvom SDN sú siete transformované do otvorených a programovateľných komponentov. SDN umožňuje sieťovým operátorom väčšiu kontrolu nad ich infraštruktúrou, optimalizáciu siete, prispôsobenie siete potrebám zákazníkov a zníženie kapitálových a operačných nákladov.

Katedra informačných sietí identifikuje tému SDN ako jednu z progresívnych technológií IP (Internet Protocol) sietí, ktorá sa začína objavovať v zozname požadovaných kompetencií pre absolventov oboru Aplikovanie sieťové inžinierstvo. Katedra preto do nového programu ASI navrhla aktualizáciu predmetu Integrácia sietí, v ktorom by sa mali absolventi danej téme venovať. Cieľom práce je teoreticky a prakticky sa oboznámiť s technológiou a v úzkej spolupráci s vedúcim vypracovať materiál implementácie SDN do vyučovania.

# 1 Analýza súčasného stavu vyučovania SDN vo svete

Technológia SDN je horúcou témou v sieťovej oblasti, čomu nasvedčuje masívny záujem poskytovateľov služieb vo svete ponúkať a vyvíjať vlastné SDN riešenia. Otázka je, ako na tento trend reagujú školy vyučujúce technické obory (napr. počítačové siete podľa tradičnej architektúry IP sietí). Poznanie stavu a spôsobu je inšpiratívne a mohlo by ovplyvniť spôsob zavádzania predmetov s danou problematikou. Preto prvou úlohou je snaha zistiť, kde a do akej miery sa vyučuje SDN vo svete, resp. ako vypadá koncept jednotlivých predmetov zameraných na SDN. Táto analýza bude slúžiť ako podklad pre vyhotovenie materiálov implementácie SDN do vyučovania na Katedre informačných sietí (KIS) v rámci študijného programu Aplikované sieťové inžinierstvo.

Podľa zistených informácií viaceré univerzity vo svete zastrešujú obory, ktoré ponúkajú predmety a výučbu SDN. Niektoré z univerzít sa priamo zapájajú do vývoja SDN. Jednou z takých univerzít je Stanford university (USA), ktorá stojí zároveň aj za zrodením SDN a protokolu OpenFlow. Študenti a profesori zo Stanford University vedú v súčasnosti výskumy SDN vo výskumnom centre ONRC (Open Networking Research Center - http://onrc.stanford.edu/projects.html). Medzi ďalšie univerzity, ktoré sa venujú vývoju SDN, patrí Princeton University a Indiana University. Na druhej strane viaceré univerzity považujú vyučovanie SDN za komplikované, pretože je náročné naplánovať výučbu novej technológie, ktorá sa neustále vyvíja. Pokiaľ sa na škole rozbehne výučba konkrétneho SDN riešenia, je dosť možné, že v tom čase bude už dané riešenie zastarané.

Zo získaných informácii som rozdelil vyučované predmety na:

- čiastočne zamerané na softvérovo-definované siete
- primárne zamerané na softvérovo-definované siete.

V nasledujúcich podkapitolách sa pokúsim popísať metodiku výučby jednotlivých škôl vo svete s čiastočným, ako aj s primárnym zameraním na SDN technológiu.

## 1.1 Výučba čiastočne zameraná na SDN

Drvivá väčšina univerzít integruje SDN do existujúcich predmetov, ktoré sú zamerané na architektúru IP sietí v podobne, ako sú na našej katedre vyučované predmety

Počítačové siete 1-3. Téme SDN sú venované zhruba 2-3 prednášky. Tieto prednášky pozostávajú z vysvetlenia základných princípov SDN, ako sú SDN architektúra, dôležitosť oddelenia riadiacej časti od dátovej časti, OpenFlow protokol a pod. V rámci cvičení sa v osnovách predmetov uvádza práca so sieťovým emulátorom Mininet, ktorý slúži ako vhodná pomôcka pri výučbe SDN. Študenti majú za úlohu vypracovať rôzne zadania v Mininete. Takto orientované predmety sa vyučujú napríklad na Northumbria University (UK) alebo na Stanford University (USA).

V súčasnosti vznikajú aj nové predmety zamerané na kombináciu technológií Cloud Computing , SDN a NFV (Network Function Virtualization), ktoré so sebou úzko súvisia. Tieto typy predmetov sa snažia pokryť zložitejšie koncepty virtualizácie v dátových centrách. Laboratórne cvičenia sú zamerané na implementáciu cloudových platforiem (Openstack, Amazon EC2) s použitím rôznych hypervízorov (KVM, XEN, VMware) a OpenFlow kontrolérov (Floodlight, OpenDayLight). Takto konštruované predmety sa vyučujú na Northwestern University (UK) a University of Colorado (USA).

Na Santa Clara University (USA) je vyučovaný predmet Network Management zameraný na konfiguračné nástroje a protokoly využívané v SDN prostrediach (NETCONF, NetFlow, YANG, SNMP). Na Clemson university v Južnej Karolíne (USA) majú zase predmet zameraný na sieťovú bezpečnosť, v ktorom riešia bezpečnosť SDN a NFV technológií.

Na AGH University of Science and Technology v Krakowe sa vyučuje SDN v rámci budúcich trendov v IP sieťach. Na stránkach predmetu uvádzajú, že študent, ktorý absolvuje predmet, musí byť schopný nakonfigurovať virtuálne prepínače, použiť kontroléry na riadenie virtualizovanej siete a musí vedieť použiť SDN technológiu na reguláciu počítačovej siete podľa potrieb aplikácie. Použitie konkrétnych riešení neuvádzajú.

## 1.2 Výučba primárne zameraná na SDN

V tejto časti som sa zameral na získanie informácií o stave vyučovania ponúkajúceho predmety primárne zamerané na SDN. Takýmto predmetom je venovaných viac ako 6 prednášok o problematike SDN.

Predmety primárne zamerané na SDN sa vyučujú na Princeton university (USA), Columbia University (USA), Stony Brook University (USA), Nation Chi Nan University (Taiwan), University of Crete (Grécko), University of Southern Carolina (USA), Carnegie Mellon University (USA), National Cheng Kung University (Taiwan), National Chiao Tung University (Taiwan), DUKE University (USA), University of Colorado (USA), University of Waterloo (Kanada), The University of Texas (USA), Charles Sturt University (Austrália), KTH Royal Institute of Technology (Švedsko).

V nasledujúcej časti uvádzam, ako a do akej hĺbky tieto univerzity vyučujú SDN v rámci prednášok a v rámci cvičení.

### 1.2.1 Výučba SDN v rámci prednášok

Väčšina univerzít (Princeton university, Stony Brook University, Nation Chi Nan University, University of Crete, University of Southern Carolina, Carnegie Mellon University, National Chiao Tung University, University of Waterloo) začína svoje prednášky úvodom do SDN technológie. Tento úvod zahŕňa historickú evolúciu sietí, nedostatky súčasných sietí, SDN koncepty, SDN princípy a históriu SDN.

Univerzity University of Waterloo, Carnegie Mellon University a University of Southern Carolina rozoberajú riadiacu a dátovú rovinu zariadení. Univerzity Princeton university, Columbia University a Stony Brook University zas rozoberajú abstrakciu SDN.

Univerzity Nation Chi Nan University, University of Crete, National Chiao Tung University, Columbia University venujú časť prednášok protokolu OpenFlow a jeho konceptu. Dbajú pritom na rozdiely vo verziách OpenFlow 1.0 až 1.5.

Univerzity University of Crete, Nation Chi Nan University, Columbia University vo svojich prednáškach uvádzajú prehľad o rôznych SDN riešeniach v podobe kontrolérov a softvérových prepínačov. Prepínače, ktorým sa venujú, sú zväčša riešenia Open vSwitch a Indigo. Medzi najčastejšie spomínané kontroléry patria NOX, POX, RYU, OpenDayLight, Floodlight, ONOS.

Univerzity Princeton university, Columbia University, Stony Brook University, DUKE University, National Chiao Tung University, University of Southern Carolina,

University of Colorado uvádzajú príklady využitia SDN v rôznych prostrediach, ako sú dátové centrá, cloudové prostredia, WAN (Wide Area Network) prostredia, bezdrôtové prostredia a mobilné prostredia. V rámci týchto prednášok sa venujú technológiám riadenia toku (traffic enginnering) a monitoringu SDN.

Univerzity Columbia University, Nation Chi Nan University, National Cheng Kung University, University of Crete, National Chiao Tung University, Carnegie Mellon University, University of Waterloo spomínajú vo svojich prednáškach aj technológiu NFV (Network Function Virtualization) v úzkom spojení s SDN.

Univerzity Princeton university, Columbia University, Stony Brook University, National Cheng Kung University, University of Crete, National Chiao Tung University, University of Southern, Carolina University of Colorado, Carnegie Mellon University, University of Waterloo riešia otázku bezpečnosti, odolnosti voči chybám, testovanie a odstraňovanie chýb SDN sietí.

Univerzity University of Waterloo, Carnegie Mellon University, University of Crete, University of Colorado spomínajú programovacie jazyky pre SDN. Zvyčajne ide o jazyky Frenetic a Pyretic.

Univerzity Princeton university, Columbia University predstavujú svoju víziu o budúcnosti SDN.

Univerzita National Chiao Tung University uvádza prednášku o SDN migrácii v hybridnej sieti s tradičnými prepínačmi.

Univerzita Nation Chi Nan University oboznamuje v prednáškach s organizáciou Open Networing Foundation (ONF).

### 1.2.2 Výučba SDN v rámci cvičení

Drvivá väčšina univerzít (Princeton university, Stony Brook University, National Cheng Kung University, National Chiao Tung University, University of Southern Carolina, University of Colorado, Carnegie Mellon University) využíva v rámci cvičení prostredie Mininet. Univerzita National Cheng Kung University na rozdiel od ostatných univerzít využíva aj alternatívne simulačné prostredie EstiNet.

Na univerzitách Carnegie Mellon University, University of Crete, Stony Brook

University sa pracuje v rámci cvičení s kontrolérom POX, na univerzitách DUKE University, University of Colorado sa pracuje s kontrolérom Floodlight, na univerzite University of Southern Carolina sa pracuje s kontrolérom ONOS a na univerzite National Cheng Kung University sa pracuje s kombináciou kontrolérov NOX a RYU.

Univerzity Stony Brook University, University of Crete, University of Southern Carolina, Carnegie Mellon University vyučujú programovanie v jazyku Pytetic, univerzita Columbia University vyučuje programovanie v jazyku Frenetic.

Univerzita National Cheng Kung University využíva na cvičeniach implementáciu OpenFlow prepínača v operačnom systéme OpenWrt.

Na univerzite University of Waterloo sa zadávajú v rámci cvičenia semestrálne projekty. Zadania vypadajú nasledovne:

- *Application Aware Networking* – monitorovanie prevádzky pomocou SDN kontroléra, nastavenie kvality služieb
- *Conducting experiments with DOT*– testovanie škálovateľnosti emulačného nástroja DOT (Distributed OpenFlow Testbed)
- *Managing the Software in Software Defined Networks* – preskúmanie problémov spojených s manažovaním rozličných SDN komponentov a ich porovnanie
- *Inter-Controller Communication* – analýza rozličných mechanizmov a návrh kritérií pre scenár nasadenia viacerých kontrolérov do produkčnej siete

# 2 Ciele práce

Hlavným cieľom práce je vyhotoviť koncept vyučovania SDN, ktorý zahŕňa metodiku čo, ako a v akom rozsahu by sa mohlo implementovať do štúdia v rámci študijného programu Aplikované sieťové inžinierstvo v predmete Integrácia sietí.

K naplneniu hlavného cieľa je potrebné realizovať parciálne ciele. Prvým parciálnym cieľom je analýza súčasného stavu vyučovania SDN vo svete. Druhým parciálnym cieľom je teoreticky a prakticky sa oboznámiť s technológiou SDN, čo pozostáva z analýzy jej princípov, architektúry a protokolov. Posledným parciálnym cieľom je vytvorenie odporúčania pre vyučovanie SDN.

V rámci tohto odporúčania je nutné vybrať vhodné témy pre prednášky a určiť ich rozsah. Taktiež je nutné navrhnúť a vybrať SDN komponenty pre cvičenia. Toto zahŕňa výber vhodnej distribúcie operačného systému Linux, SDN kontroléra, SDN prepínača a výber vhodného hardvéru. Posledným krokom je vypracovanie vybraných tém pre prednášky a praktických demonštrácií pre cvičenia.

# 3 Oboznámenie sa s technológiou SDN

Predtým ako začnem rozoberať konkrétne SDN implementácie, uvediem čitateľa do problematiky SDN.

## 3.1 Potreba SDN

Potreba SDN je v súčasnosti odôvodnená viacerými faktormi. Explózia mobilných zariadení [1], nástup serverovej virtualizácie a príchod cloudových služieb patria k trendom, ktoré predstavujú výzvu pre tradičné sieťové architektúry. Mnoho dnešných sietí je hierarchických, stavaných na ethernetových prepínačoch zapojených do stromovej štruktúry. Tento dizajn mal zmysel, keď bola dominantná klient-server sieťová architektúra. Avšak takáto statická architektúra je nežiaduca pre dynamické výpočtové a úložiskové potreby v dnešných dátových centrách, v campus alebo carrier prostrediach.

Súčasné sieťové technológie [2] pozostávajú z veľkého množstva protokolov navrhnutých na prepojenie koncových staníc spoľahlivo cez ľubovoľné vzdialenosti, linky rôznych rýchlostí a rozličné topológie. Aby sa vyhovelo technickým a biznis podmienkam za posledné desaťročia, odvetvie vyvinulo sieťové protokoly pre zvýšenie výkonu, spoľahlivosti, konektivity, bezpečnosti, pričom sa upustilo od nejakej základnej abstrakcie. To vyústilo v základný problém dnešných sietí, ktorý je **komplexnosť**. Napríklad v situácii, keď chceme pridať alebo premiestniť zariadenie v sieti, musíme zasiahnuť aj do samotných sieťových prvkov ako sú prepínače, smerovače, firewally a upraviť ich konfiguráciu (ako napríklad nastavenie funkcií Access Control List, Virtual Local Area Network, Quality of Service). Kvôli tejto komplexnosti a následne spojenej problematickej správe sú dnešné siete pomerne statické.

Statická povaha tradičných sietí [1] je v kontraste s dynamickou povahou v serverových prostrediach, ako sú dátové centrá. S nástupom serverovej virtualizácie sa výrazne zvýšil počet koncových staníc v dátových centrách vyžadujúcich sieťovú konektivitu. Jedno veľké dátové centrum [2] môže pozostávať až zo 120 000 fyzických serverov (napríklad dátové centrum Microsoftu). Zoberme do úvahy fakt, že na každom fyzickom serveri v takomto dátovom centre je prevádzkovaných v priemere 20 virtuálnych serverov. To znamená, že interná sieť vo veľkom dátovom centre môže prepájať až 2 400

000 koncových serverov. Prevádzka v takejto sieti je nepredvídateľná a dynamicky sa meniaca. Dátové centrá veľkých spoločností ako sú Facebook, Google, Amazon sa musia vyrovnávať s potrebou škálovateľnosti ich činnosti a prevádzky, čo prináša obrovské nároky na konfiguráciu a manažment.

Moderné L2 a L3 prepínače [2], ktoré typicky tvoria aktívnu sieťovú infraštruktúru týchto dátových centier, využívajú pri svojej činnosti pomerne veľké množstvo rôznych sieťových protokolov (Label Discovery Protocol, Multiprotocol Label Switching, Internet Group Management Protocol, Multicast Source Discovery Protocol, Protcol Independent Multicast a pod.), ktoré zaťažujú ich riadiacu rovinu. Zmena prevádzkovanej topológie v takejto sieti sa zvyčajne prejaví na rastúcom čase konvergencie, kedy riadiaca rovina zariadení musí spraviť nové výpočty, poprípade ich rozdistribuovať, aby pracovné tabuľky s L2 alebo L3 informáciami (ovplyvňujúcimi činnosť na dátovej rovine) na každom zariadení ostali v stave odrážajúcom vykonanú zmenu. Tento fakt sa stáva nežiaducim v prípade topologickej zmeny v dátových centrách, kedy riadiaca rovina zariadení môže spôsobiť neakceptovateľne dlhý čas konvergencie. Dôležité je si uvedomiť, že fyzická sieťová infraštruktúra v dátovom centre je statická, dopredu známa, prevažne stabilná a centrálne kontrolovaná. Preto sa zdá byť výhodné navrhnúť nový jednoduchší prístup, v ktorom by sa oddelila riadiaca rovina zariadení od tej dátovej. Dosiahli by sme tak programovateľnosť dátových časti zariadení z iného miesta v sieti.

## 3.2 Koncept technológie SDN

Ako dôsledok spomenutých nedostatkov dnešných sietí vzniká nový prístup s názvom SDN (Software-Defined Networking). SDN [1] je v podstate sieťová architektúra, v ktorej je riadiaca rovina zariadení oddelená od dátovej roviny. Riadenie siete je tak presunuté zo zariadenia samotného do iného centralizovaného výpočtového zariadenia. Týmto je riadenie siete oddelené od samotného preposielania dát, čím sa dátová rovina zariadení stáva priamo programovateľná.

Táto migrácia riadenia [2] do iného výpočtového zariadenia umožňuje abstrakciu fyzickej sieťovej infraštruktúry pre aplikácie a sieťové služby, ktoré môžu zaobchádzať so sieťou ako s logickou alebo virtuálnou entitou (Obr. 1). Vďaka tejto abstrakcii sa môžu

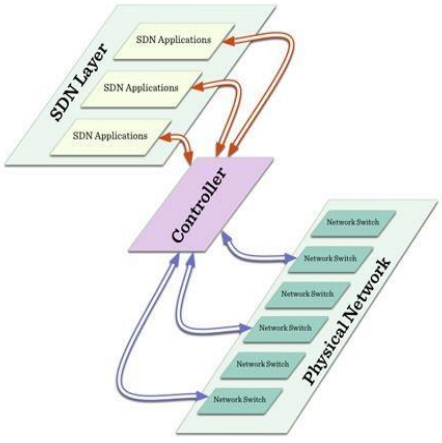
aplikácie a prostriedky na aplikovanie politík pozerať na sieť ako na jeden veľký logický prepínač.

Celá sieťová inteligencia [1] je centralizovane umiestnená do výpočtových softvérovo-založených zariadení, tzv. kontrolérov, ktoré sa starajú o globálny pohľad siete. S použitím kontrolérov nadobúdame kontrolu nad celou sieťou z jedného logického bodu, čím sa rapídne zjednoduší dizajn siete a sieťové operácie.

SDN taktiež zjednodušuje samotné sieťové zariadenia, pretože už nepotrebujú podporovať tisícky protokolových štandardov, ale stačí im prijímať inštrukcie od SDN kontroléra.

Sieťoví administrátori môžu vďaka SDN automatizovane konfigurovať celú sieť z jedného miesta v porovnaní s tým, ako by mali manuálne konfigurovať viacero nezávislých zariadení. Taktiež môžu modifikovať správanie siete v reálnom čase a nasadzovať nové aplikácie a sieťové služby v priebehu pár hodín v porovnaní s týždňami alebo mesiacmi, ako je to dnes bežné [1].

SDN [2] bolo vytvorené s myšlienkou podporiť otvorenosť sieťových prostredí. Špecifikácie SDN a SDN softvér boli distribuované voľne medzi univerzitnými skupinami bez komerčných dotácií. Hlavní podporovatelia SDN boli jednotlivci a inštitúcie, ktorých cieľom nebolo vyťažiť zisk z predaja technológie. Aj keď aktuálne vzrastá počet proprietárnych SDN technológií na trhu, štandardizačné SDN organizácie veria, že otvorenosť ostane charakteristikou SDN naďalej. Jednou z organizácií, ktorá podporuje otvorenosť SDN, je organizácia Open Networking Foundation (ONF), ktorá štandardizuje otvorené API rozhrania pre podporu zariadení od viacerých výrobcov.



## 3.3 Architektúra SDN

Vývoj SDN prináša nové aspekty (napr. v oblasti programovateľnosti), čím dochádza k nejasnostiam v definíciách týkajúcich sa technológie SDN a jej architektúry. Niektoré definície architektúry SDN si dokonca navzájom odporujú [4]. Tieto nedostatky v definíciách sú skonsolidované v dokumente RFC 7426 [4], ktorý popisuje SDN architektúru komplexne vzhľadom na aktuálny stav. Tento dokument používa nasledovné pojmy v spojitosti s architektúrou SDN:

- zdroj – fyzický alebo virtuálny komponent v rámci systému, môže byť jednoduchý (port alebo front) alebo komplexný (sieťové zariadenie)
- sieťové zariadenie (fyzické alebo virtuálne) – vykonáva jednu alebo viacero sieťových operácií spojených s paketovým spracovaním a preposielaním
- rozhranie – bod interakcie medzi dvoma entitami
- aplikácia – softvér, ktorý používa služby na vykonanie funkcií
- služba – softvérové programy, ktoré poskytujú API rozhrania ostatným aplikáciám alebo službám
- roviny (preposielacia rovina, operačná rovina, riadiaca rovina, manažmentová rovina, aplikačná rovina)
- abstrakčné vrstvy (abstrakčná vrstva zariadení a zdrojov, riadiaca abstrakčná vrstva, manažmentová abstrakčná vrstva, abstrakčná vrstva sieťových služieb)

SDN architektúra podľa dokumentu RFC 7426 pozostáva z nasledujúcich rovín (Obr. 2):

- preposielacia rovina (forwarding plane)
  - zodpovedná za spracovanie paketov na dátovej ceste
  - založená na inštrukciách prijatých od riadiacej časti
  - akcie na preposielacej rovine pozostávajú (nie len) z preposielania, zahodenia a zmeny paketov
  - bod ukončenia pre služby a aplikácie riadiacej roviny
  - môže obsahovať preposielacie zdroje v podobe klasifikátorov
  - nazývaná aj dátová rovina alebo dátová cesta
- operačná rovina (operational plane)

  - zodpovedná za manažovanie operačných stavov sieťových zariadení, napríklad počet dostupných portov, stav každého portu
  - bod ukončenia pre služby a aplikácie manažmentovej roviny
  - týka sa zdrojov sieťových zariadení ako sú pamäť, porty a podobne
- riadiaca rovina (control plane)
  - zodpovedná za vykonávanie rozhodnutí, ako by pakety mali byť preposielané jedným alebo viacerými sieťovými zariadeniami
  - zodpovedná za aplikovanie rozhodnutí, ktoré majú byť vykonané sieťovými zariadeniami
  - zameriava sa viac na preposielaciu rovinu ako na operačnú rovinu zariadení
  - môže sa zaujímať o informácie operačnej roviny, ako je napríklad súčasný stav daného portu alebo jeho kapacít
  - hlavnou úlohou riadiacej roviny je doladenie preposielacích tabuliek uložených v dátovej rovine, ktoré sú založené na sieťovej topológií alebo požiadavkách externých služieb
- manažmentová rovina (management plane)
  - zodpovedná za monitoring, konfiguráciu a údržbu sieťových zariadení, napríklad vykonávanie rozhodnutí na základe stavu sieťového zariadenia
  - zameriava sa viac na operačnú rovinu ako na preposielaciu rovinu zariadení
  - môže byť použitá na konfiguráciu preposielacej roviny
  - môže nastaviť všetky alebo len časť preposielacích pravidiel naraz, ale takáto funkcia sa používa len výnimočne  aplikačná rovina (application plane)
  - rovina, kde sídlia aplikácie a služby, ktoré definujú správanie siete
  - aplikácie, ktoré priamo podporujú operačnú alebo preposielaciu rovinu (ako napríklad smerovacie procesy v rámci riadiacej roviny), nie sú považované za súčasť aplikačnej roviny
  - aplikácie môžu byť implementované v modulárnej alebo distribuovanej forme a z toho dôvodu sa môžu pohybovať po viacerých rovinách SDN architektúry

Všetky vrstvy SDN architektúry sú prepojené rozhraniami. Rozhranie môže vystupovať vo viacerých roliach podľa pripojených rovín sídliacich na rovnakom fyzickom

alebo virtuálnom zariadení. Ak príslušné roviny sú navrhnuté tak, aby sa nemuseli nachádzať na rovnakom zariadení, potom rozhrania môžu vystupovať vo forme protokolu.

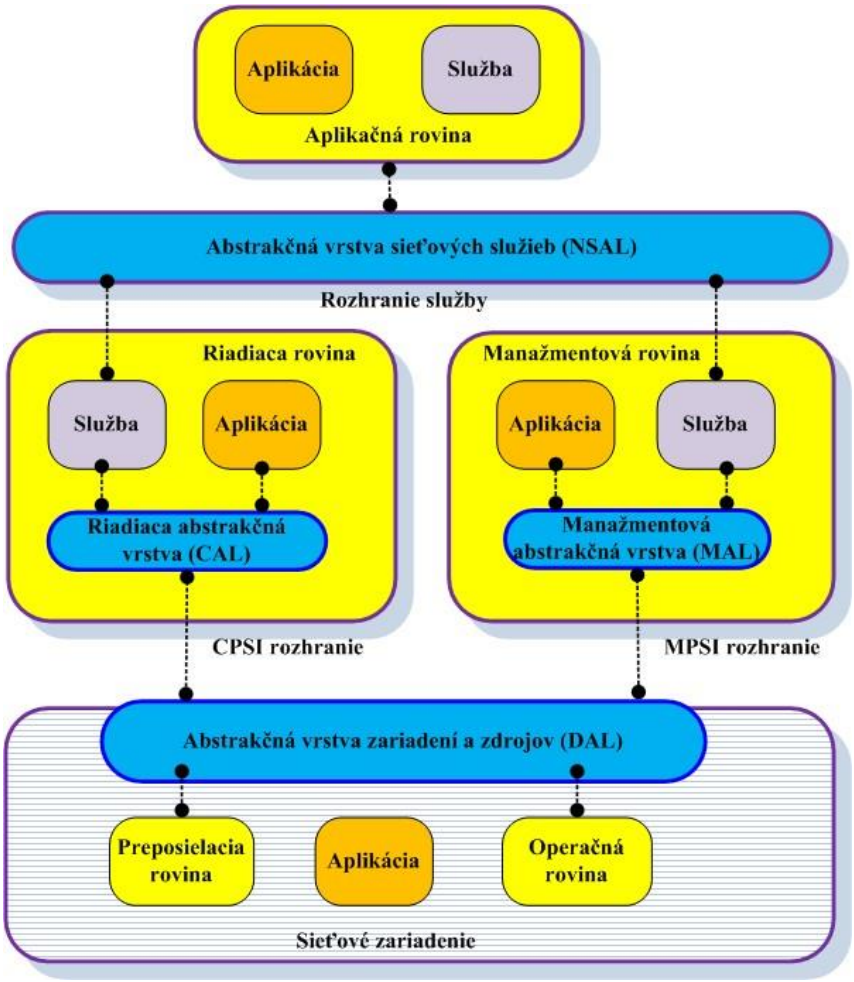
Ak sú roviny umiestnené na rovnakom zariadení, potom by rozhranie malo byť implementované cez otvorený/proprietárny protokol, otvorené/proprietárne softvérové medziprocesové komunikačné API rozhranie alebo cez systémové volania jadra operačného systému.

Aplikácie resp. softvérové programy vykonávajúce špecifické výpočty, ktoré využívajú služby bez poskytovania prístupu k iným aplikáciám, môžu byť implementované natívne vo vnútri roviny alebo môžu premosťovať viacero rovín.

Služby resp. softvérové programy, ktoré poskytujú API rozhrania ostatným aplikáciám alebo službám, môžu byť taktiež natívne implementované v špecifických rovinách.

Dokument RFC 7426 predpokladá 4 abstrakčné vrstvy (Obr. 2):

- abstrakčná vrstva zariadení a zdrojov (DAL) – abstrahuje zdroje preposielacej a operačnej roviny zariadení do riadiacej a manažmentovej roviny
- riadiaca abstrakčná vrstva (CAL) – abstrahuje rozhranie CPSI (Control-Plane Southbound Interface) a vrstvu DAL od aplikácií a služieb riadiacej roviny
- manažmentová abstrakčná vrstva (MAL) – abstrahuje rozhranie MPSI (Management-Plane Southbound Interface) a vrstvu DAL od aplikácií a služieb manažmentovej roviny
- abstrakčná vrstva sieťových služieb (NSAL) – poskytuje abstrakciu služieb pre použitie aplikácií a iných služieb




Obr. 2 Architektúra SDN

## 3.4 OpenFlow

OpenFlow [1] je prvé štandardizované komunikačné rozhranie definované medzi riadiacou a preposielacou rovinou SDN architektúry. Bol vytvorený v roku 2008 na Stanford university ako súčasť programu Clean Slate.

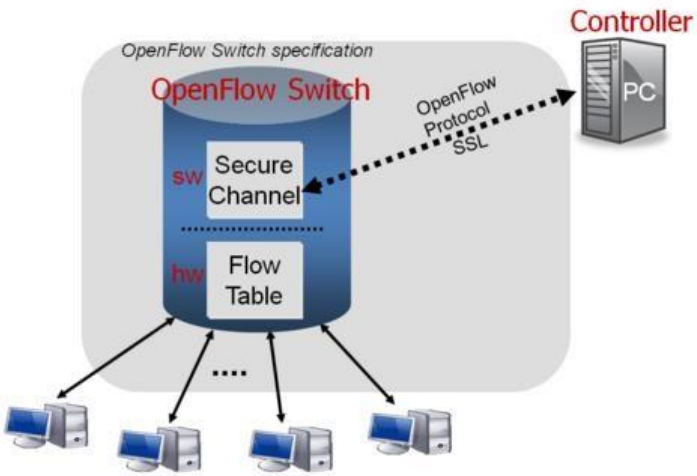
OpenFlow umožňuje manipulovať preposielaciu rovinu sieťových zariadení, ako sú smerovače a prepínače bez ohľadu, či sú fyzické alebo virtuálne. OpenFlow môže byť prirovnaný k inštrukčnej množine procesora, pretože špecifikuje základné správy, ktoré môžu byť použité externou softvérovou aplikáciou k naprogramovaniu preposielacej roviny sieťových zariadení presne v takom štýle, ako inštrukčná sada procesora môže naprogramovať počítačový systém.

OpenFlow protokol je implementovaný na oboch stranách rozhrania medzi sieťovými zariadeniami tvoriacimi infraštruktúru a SDN riadiacim softvérom. OpenFlow používa koncept tokov na identifikovanie sieťovej prevádzky založenej na preddefinovaných pravidlách zhody, ktoré môžu byť staticky alebo dynamicky naprogramované SDN riadiacim softvérom. SDN architektúra založená na protokole OpenFlow, poskytuje kontrolu a možnosť siete reagovať na zmeny v reálnom čase.

OpenFlow je štandardizovaný organizáciou ONF, ktorá zabezpečuje kompatibilitu medzi sieťovými zariadeniami a riadiacim softvérom rozličných výrobcov.

OpenFlow architektúra [5] pozostáva z 3 základných konceptov (Obr. 3):

1. Sieť je postavená z OpenFlow prepínačov, ktoré tvoria dátovú rovinu.
2. Riadiaca rovina pozostáva z jedného alebo viacerých kontrolérov.
3. Zabezpečený riadiaci kanál prepája prepínače s riadiacou rovinou (kontrolérom).




Obr. 3 OpenFlow architektúra [6]

# 4 Prieskum dostupných SDN riešení

V tejto časti sa budem snažiť popísať dostupné SDN riešenia. Toto zahŕňa popis softvérových SDN prepínačov, SDN kontrolérov, hardvérových SDN prepínačov, komplexných SDN riešení a emulačných SDN prostredí.

## 4.1 Softvérové SDN prepínače

### 4.1.1 Open vSwitch

Open vSwitch je softvérová implementácia virtuálneho viacvrstvového sieťového prepínača. Open vSwitch [7] bol vytvorený tímom spoločnosti Nicira, ktorú neskôr odkúpila spoločnosť VMware. Open v Switch bol primárne plánovaný pre potreby open source komunity v dobe, keď neexistoval žiadny funkciovo-bohatý virtuálny prepínač navrhnutý pre hypervizory bežiace v Linuxe, ako sú KVM a XEN. Open vSwitch sa stal rýchlo východiskovým riešením pre prostredia využívajúce hypervizora XEN. Dnes Open vSwitch zohráva veľmi dôležitú úlohu v iných open source projektoch, ako je napríklad cloudové riešenie OpenStack.

Open vSwitch [7] je rozhodujúci prvok pre mnoho SDN nasadení v dátových centrách, pretože spája dokopy všetky virtuálne servery v rámci hypervizora bežiaceho na serveri. Je to prvý vstupný bod pre všetky virtuálne servery posielajúce prevádzku do siete a je to aj vstupný bod do overlay sietí bežiacich nad fyzickou sieťou v dátovom centre. Ďalší dôvod pre použitie riešenia Open v Switch v dátových centrách je sieťová virtualizácia, kde Open vSwitch zohráva kľúčovú úlohu. Open vSwitch môže byť použitý taktiež pre smerovanie prevádzky cez sieťové funkcie (network functions).

Open vSwitch je zvyčajne riadený a manažovaný treťou stranou prostredníctvom kontrolérov. Avšak to neznamená, že SDN kontrolér je potrebný pre využívanie Open vSwitcha. Open vSwitch je možné nasadiť na server za cieľom vykonávania tradičnej L2 prepínacej funkcionality.

Open vSwitch podporuje:

- zber dát cez protokoly NetFlow, sFlow, IPFIX
- zrkadlenie prevádzky cez protokoly SPAN, RSPAN, ERSPAN

- protokol OpenFlow 1.x
- tunelovacie mechanizmy: GRE, Geneve, VXLAN, STT, LISP

### 4.1.2 Indigo Virtual Switch

Indigo Virtual Switch (IVS) [8] je open source virtuálny prepínač určený pre systémy LINUX s KVM hypervizorom. IVS využíva Open vSwitch modul jadra pre preposielanie paketov. IVS je súčasťou projektu Indigo Framework a využíva LoxiGen generovaný kód (loci) na spracovanie OpenFlow správ.

Projekt je distribuovaný pod EPL open source licenciou a je udržiavaný komunitou vývojárov a inžinierov zo spoločnosti Big Switch Networks.

IVS je odľahčený vysokovýkonný prepínač pre podporu protokolu OpenFlow. Je navrhnutý pre podporu aplikácií sieťovej virtualizácie a podporuje distribúciu cez fyzické servery použitím OpenFlow kontroléra.

### 4.1.3 Cisco Virtual Topology Forwarder

Cisco Virtual Topology Forwarder (VTF) [9] je odľahčený softvérový prepínač navrhnutý na vysokovýkonné paketové spracovanie na x86 serveroch. VTF je súčasťou otvoreného škálovateľného SDN riešenia Cisco VTS (Virtual Topology System) určeného pre virtuálny sieťový manažment v dátových centrách. VTF využíva inovatívnu technológiu od Cisca s názvom Vector Packet Processing (VPP) a Intel Data Path Development Kit (DPDK) pre L2, L3 a VXLAN paketové preposielanie umožňujúce priepustnosť až 10 Gbps na jednom procesorovom jadre. VTF je viacvláknový, čo umožňuje zákazníkom alokovať ďalšie procesorové jadrá na škálovanie výkonu.

## 4.2 SDN kontroléry

### 4.2.1 POX

POX [10] je open source platforma SDN kontroléra vyvíjaná Stanfordskou univerzitou založená na jazyku Python. POX je nástupca sesterského SDN kontroléra NOX, pričom POX ponúka jednoduchšie prostredie a dobre napísané API rozhranie s prehľadnou dokumentáciou. POX je navrhnutý pre rýchlejší vývoj a je veľmi užitočný pre programovanie vlastného sieťového softvéru. POX poskytuje taktiež webové grafické

rozhranie. Použitím POX kontroléra [11] môžeme premeniť SDN zariadenia na hub, prepínač, load balancer alebo firewall.

### 4.2.2 Floodlight

Floodlight [12] je OpenFlow SDN kontrolér patriaci pod Apache licenciu a spoločnosť Big Switch Networks. Bol súčasťou projektu OpenDayLight, ale v júni 2013 spoločnosť Big Switch od tohto projektu odstúpila. Floodlight je založený na jazyku Java a je vyvíjaný otvorenou komunitou vývojárov. Floodlight zahŕňa v sebe:

- modulový načitávací systém, ktorý umožňuje rýchlejšie rozšírenie a vylepšenie
- ľahkú inštaláciu s minimálnou potrebou inštalovania závislostí
- podporuje široké spektrum virtuálnych a fyzických OpenFlow prepínačov
- ponúka vysoký výkon (je viacvláknový)
- podporuje cloudovú orchestračnú platformu OpenStack
- ponúka webové rozhranie
- podporuje komunikáciu cez REST (Representational state transfer) API rozhranie

### 4.2.3 OpenDayLight

OpenDayLight [13] je vysoko dostupný modulárny rozšíriteľný škálovateľný multiprotokolový kontrolér pod organizáciou Linux Foundation. Je určený pre nasadenie SDN do moderných heterogénnych sietí postavených na zariadeniach rôznych výrobcov. OpenDayLight poskytuje modelovo-orientovanú abstrakčnú platformu služieb, ktorá umožňuje používateľom programovať aplikácie, ktoré pracujú s rôznymi hardvérovými a southbound protokolmi. OpenDaylight je napísaný v Jave a pozostáva z rôznych modulov, ktoré môžu byť kombinované podľa potreby.

V súčasnosti existujú už 4 softvérové vydania projektu OpenDayLight. Prvé vydanie je nazvané Hydrogen, druhé vydanie Hellium, tretie vydanie Lithium a štvrté posledné aktuálne sa nazýva Beryllium.

OpenDayLight využíva v sebe nástroj Maven, OSGi (Open Services Gateway initiative) rozhrania a REST API rozhrania. OpenDayLight podporuje široké spektrum protokolov, ako sú OpenFlow, SNMP, LISP, OVSDB, BGP-LS, VNT a ďalšie.

### 4.2.4 OpenMUL

OpenMUL [14] je OpenFlow/SDN platforma kontroléra, ktorá je napísaná v jazyku C. Jadro kontroléra OpenMUL má viacvláknovú štruktúru. OpenMUL podporuje viacúrovňové northbound rozhranie pre hosťujúce aplikácie a zameriava sa na southbound protokoly ako sú OpenFlow, OVSDB, NETCONF, OF-CONFIG. OpenMUL je navrhnutý pre výkon a spoľahlivosť. Je taktiež vysoko flexibilný, modulárny a ľahko naučiteľný.

OpenMUL pozostáva z týchto hlavných častí:

MUL jadro

- MUL služby infraštruktúry
- MUL systémové aplikácie

MUL služby infraštruktúry tvorí:

- Topology Discovery Service: Využíva LLDP pakety na objavenie sieťovej prepínacej topológie. Taktiež zabezpečuje detekciu a predchádzanie sieťových slučiek na žiadosť v interakcii s MUL jadrom.
- Path Finding Service: Využíva FFloyd-Warshallov algoritmus na výpočet najkratšej cesty medzi dvoma sieťovými uzlami.
- Path Connector Service: Poskytuje flexibilné rozhranie pre aplikácie na inštaláciu tokov pozdĺž cesty.

MUL systémové aplikácie tvorí:

- L2switch: Poskytuje L2 učiacu sa prepínanú logiku.
- CLI app: Poskytuje CLI nástroj pre všetky MUL komponenty.
- NBAPI webserver: Poskytuje RESTful API rozhranie pre MUL kontrolér.

### 4.2.5 Open Network Operating System

Open Network Operating System (ONOS) [15] je SDN operačný systém pre poskytovateľov služieb implementovaný v Jave, ktorý ponúka škálovateľnosť, vysokú dostupnosť, vysoký výkon a abstrakcie pre jednoduchšie vytváranie aplikácií a služieb. ONOS je navrhnutý ako operačný systém založený na klasteroch, ktorý je škálovateľný horizontálne s veľkosťou siete a potrebami aplikácie. ONOS umožňuje jednoduchšie

programovanie aplikácii s bohatými northbound abstrakciami, ktoré zabezpečujú komplexný sieťový pohľad na aplikácie. Pripojiteľné southbound rozhranie dovoľuje riadenie klasických prepínačov a prepínačov založených na protokole OpenFlow.

## 4.3 Hardvérové SDN produkty

Aktuálne mnoho výrobcov sieťových zariadení implementuje podporu SDN do svojich produktov. Medzi najväčších hráčov na trhu patria Ciena, Cisco, Juniper, Brocade, BigSwitch, IBM, HP, NEC, Arista Networks a Pica8.

Vybral som si niekoľko kľúčových výrobcov sieťových zariadení a popísal ich ponuku hardvérových SDN produktov. Do tejto ponuky produktov pripájam aj jednodoskové vstavané počítače, ktoré nie sú primárne orientované na SDN, ale SDN funkcionalita sa do nich dá implementovať.

### 4.3.1 Pica8

Pica8 je prvá spoločnosť ponúkajúca otvorené prepínače nezávislé na hardvéri. Na fyzickom prepínacom hardvéri je prevádzkovaný PicaOS, otvorený sieťový operačný systém, ktorý podporuje štandardné L2/L3 protokoly spoločne s podporou protokolu OpenFlow cez integráciu prepínača Open vSwitch. Medzi hardvérové produkty Pica8 patria prepínače P-5401 (32x40G), P-5101 (40x10G, 8x40G), P-3930 (48x10G-T,4x40G), P-3922 (48x10G,4x40G), P-3297 (48 x 1G-T, 4 x 10G).

### 4.3.2 Brocade

Brocade zaviedol OpenFlow podporu v júni 2010. Prvé podporované zariadenia boli MLX smerovače. V súčasnosti OpenFlow 1.3 podporujú zariadenia: CES prepínače, CER smerovače, ICX prepínače (do campusov), VDX prepínače (do dátových centier).

### 4.3.3 HP

HP má širokú škálu OpenFlow kompatibilných produktov. Medzi ne patria prepínače rady 2920, 3500, 3800, 5400, 6200, 6600, 8200.

### 4.3.4 Cisco

Cisco podporuje OpenFlow vo verziách 1.0 a 1.3. Na niektoré zariadenia s kompatibilným operačným systémom (IOS-XE, NX-OS, IOS-XR) ponúka Cisco Plug-in pre Openflow (Nexus 3000, Nexus 6000, Catalyst 4500E). V súčasnosti implementuje OpenFlow podporu do nových prístupových prepínačov Catalyst 3850 a Catalyst 3650.

### 4.3.5 Juniper

Juniper ohlásil v júni 2012 svoju prvú SDN stratégiu zameranú na riešenia bezpečnosti pre dátové centrá. V súčasnosti Juniper do svojich zariadení pridáva podporu OpenFlow vo verzii 1.3. Medzi tieto zariadenia patria smerovače rady MX a prepínače rady EX.

### 4.3.6 Mikrotik

Mikrotik do svojich zariadení implementuje OpenFlow podporu vo verzii 1.0 prostredníctvom operačného systému RouterOS. Avšak súčasná implementácia je čisto experimentálna a nie je doporučené ju používať v produkčných prostrediach. OpenFlow podpora je k dispozícii len ako samostatný balíček.

Ďalšia možnosť ako implementovať podporu protokolu OpenFlow do Mikrotik zariadenia je nainštalovať operačný systém OpenWrt. OpenWrt je GNU/Linux distribúcia pre zabudované zariadenia rôznych výrobcov vrátane Mikrotiku. Pre OpenWrt existujú aplikácie Open vSwitch a Pantou, ktoré dokážu spraviť z klasického smerovača plnohodnotné SDN zariadenie. Pantou je aplikácia vyvíjaná univerzitou Stanford university a podporuje OpenFlow vo verzii 1.3.

### 4.3.7 Jednodoskové vstavané počítače

Vychádzam z analýzy jednodoskových vstavaných počítačov v diplomovej práci od M. Kršku [16], v ktorej sú spomenuté zariadenia Cubleboard1, Cubleboard2, Banana PI, Raspberry PI model B+. Na týchto zariadeniach je možné spustiť známe distribúcie Linuxu, ako napríklad Ubuntu, Debian, OpenSuse, Fedora. Vďaka tomu je možné do týchto zariadení implementovať ľubovoľný linuxový SDN prepínač, a tak z nich spraviť hardvérové SDN zariadenie.

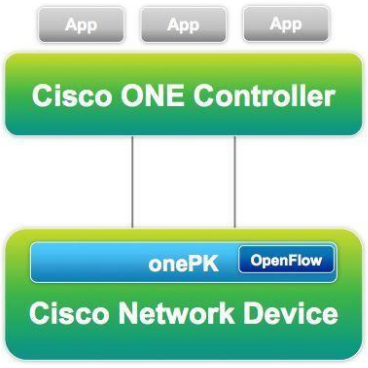
## 4.4 Komplexné SDN riešenia

### 4.4.1 Cisco ONE

Cisco [17] prišlo na trh v júni 2012 s oficiálnym SDN riešením Cisco Open Network Enviroment (ONE). Túto platformu tvoria agenti, API rozhrania, kontroléry, sieťové technológie, ktoré umožňujú programovateľnosť na rozličných vrstvách SDN architektúry. Cisco ONE prostredie zahŕňa (Obr. 4):

- **Cisco ONE Platform Kit (onePK) –** balík API rozhraní, ktorý umožňuje aplikáciam riadiť Cisco zariadenia bez použitia príkazového riadka. Cisco onePK je dostupné na platformách Cisco IOS, IOS-XE, IOS-XR a NX-OS.
- **Cisco ONE Controller –** riadiaca časť pre skupinu zariadení podporujúcich platformu ONE. Aktuálne Cisco ponúka komerčnú distribúciu kontroléra OpenDayLight s názvom Cisco Open SDN Controller vo verzii 1.2.
- **Overlay networks –** balík produktov, ktorý poskytuje overlay siete, virtualizačné služby a orchestračné možnosti, založený na zariadeniach Cisco Nexus 1000V, CSR 1000V.

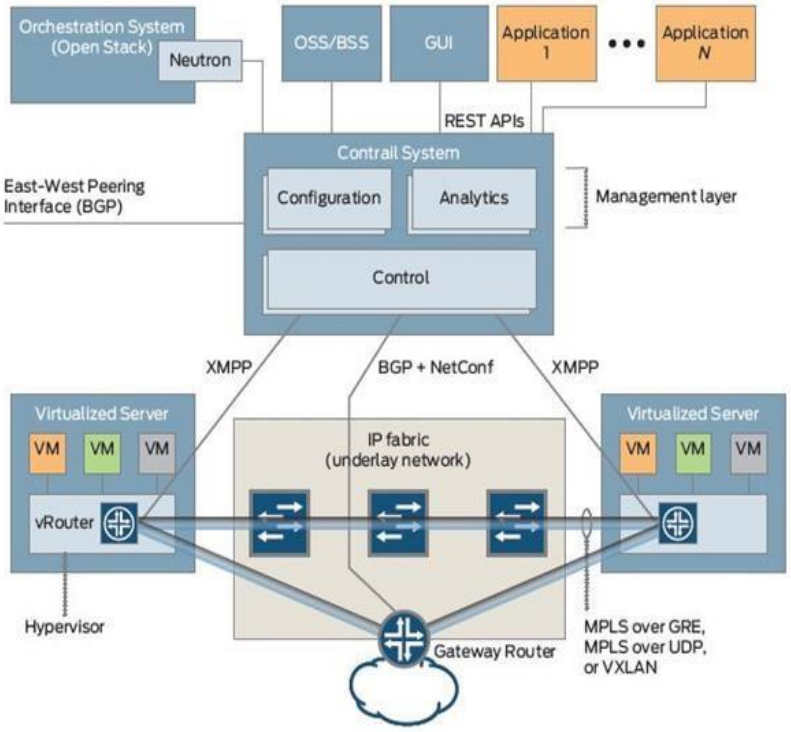
V súčasnosti Cisco tlačí do popredia namiesto riešenia ONE svoje nové riešenie Cisco ACI (Application Centric Infrastructure), ktoré sčasti spĺňa podmienky SDN riešenia a sčasti nie. Cisco ACI je architektúra s pevne zviazanou infraštruktúrou založenou na politikách.




Obr. 4 Cisco ONE architektúra [18]

### 4.4.2 Juniper Contrail

V septembri 2013 Juniper vypustil prvú verziu svojho komplexného SDN riešenia s názvom Juniper Contrail, ktorý automatizuje vytváranie škálovateľných virtuálnych sietí. Toto riešenie [19] je navrhnuté na použitie v dátových centrách resp. cloudových prostriedach (Openstack, Cloudstack) a na orchestráciu resp. manažment sieťových funkcií (NFV) v sieti poskytovateľa služieb. Juniper Contrail pozostáva z dvoch hlavných komponentov – Contrail SDN Controller a Contrail SDN vRouter. Architektúru Contrailu tvorí viacero protokolov a technológií (Obr. 5). Obzvlášť je zaujímavá absencia protokolu OpenFlow v Contrail riešení, ktorý je nahradený XMPP protokolom. Okrem komerčného riešenia Contrail Juniper taktiež ponúka jeho open source verziu s názvom OpenContrail (web: *http://www.opencontrail.org/)* pod licenciou Apache 2.0.




Obr. 5 Juniper Contrail architektúra [19]

## 4.5 SDN emulátory

### 4.5.1 Mininet

Mininet [20] je sieťový emulátor, ktorý emuluje kompletnú sieť z virtuálnych počítačov, prepínačov a liniek na jednom serveri. Mininet vytvára virtuálnu sieť použitím virtualizácie založenej na procesoch a tzv. sieťových oblastí mien (namespaces), ktoré sú implementované do súčasných linuxových jadier.

V Mininete sú virtuálne počítače emulované ako *bash* procesy bežiace v sieťovej oblasti mien, čo umožňuje spustiť ľubovoľný kód (napríklad web server alebo klientskú aplikáciu) vo vnútri virtuálneho počítača. Virtuálny počítač v Mininete ma svoje vlastné privátne sieťové rozhranie a môže vidieť len svoje vlastné procesy.

Prepínače v Mininete predstavujú softvérovo-založené prepínače podporujúce protokol OpenFlow (Open vSwitch, OpenFlow referenčný prepínač). Linky sú virtuálne ethernetové páry, ktoré sú prevádzkované v Linuxovom jadre a prepájajú emulované prepínače s emulovanými virtuálnymi počítačmi (procesmi).

Mininet je skvelý nástroj na vývoj a experimenty s protokolom OpenFlow a SDN systémami. Je aktívne vyvíjaný, podporovaný a vydaný pod BSD Open Source licenciou. Zdrojový kód Mininetu je takmer celý napísaný v jazyku Python.

### 4.5.2 EstiNet

EstiNet [21] je OpenFlow sieťový simulátor a emulátor. Podporuje dva módy – simulačný a emulačný mód. V simulačnom móde OpenFlow kontroléry ako NOX, POX, Floodlight, OpenDayLight a Ryu môžu byť priamo spustené na uzle kontroléra v simulovanej sieti. V emulačnom móde tieto kontroléry môžu byť spustené na externých serveroch oddelených od servera, na ktorom sú spustené simulované OpenFlow prepínače.

Hlavný rozdiel medzi Mininetom a EstiNetom je ten, že Mininet nedokáže garantovať preposielanie paketov rovnakou rýchlosťou. EstiNet v simulačnom móde simuluje presné vlastnosti liniek, ktoré prepájajú simulované OpenFlow prepínače. Tieto vlastnosti zahŕňajú šírku pásma linky, oneskorenie linky, časový prestoj linky a MAC (Medium Access Control) protokol použitý pozdĺž linky. EstiNet umožňuje zhromaždiť informácie o výsledkoch a vyhodnotiť výkon dátových tokov celej OpenFlow siete.

# 5 Návrh implementácie SDN do vyučovania

Návrh implementácie SDN do vyučovania pozostáva z výberu komponentov SDN riešenia, z výberu a zariadenia laboratória na KIS, z návrhu osnovy založenej na identifikácií kľúčových tém SDN pre predmet Integrácia sietí a nakoniec z návrhu ďalších možností skúmania SDN na KIS.

## 5.1 Výber komponentov SDN riešenia

### 5.1.1 Výber SDN prepínača

Vďaka širokému využitiu a podpory širokého spektra funkcií som sa rozhodol pre virtuálny prepínač Open vSwitch. Pri výbere som zohľadnil jednoduchosť inštalácie, podporu protokolu OpenFlow, jednoduchosť ovládania a podporu tunelovacích protokolov.

Open vSwitch je implementovaný do viacerých SDN riešení a je prevádzkovaný v mnohých veľkých produkčných prostrediach. Open vSwitch je implementovaný aj do emulačného prostredia Mininet, ktoré sa osvedčilo ako veľmi dobrý prostriedok na výučbu SDN.

### 5.1.2 Výber kontroléra

Keďže je k dispozícií veľké množstvo kontrolérov, rád by som do vyučovacieho procesu začlenil viac ako jeden kontrolér, aby si študenti mohli osvojiť rozličné prístupy a prostredia rozličných kontrolérov.

Na začiatku som pri výbere zvažoval použitie kontroléra OpenDayLight, keďže je to aktuálne najprogresívnejší a najvyvíjanejší kontrolér. Avšak konfigurovať toky prepínačom sa mi podarilo len cez jeho REST API rozhranie. Tento spôsob ovládania mi prišiel zdĺhavý a nepraktický pre potreby výučby. Hľadal som teda kontroléry s alternatívnejším a jednoduchším prístupom vzhľadom na konfiguráciu tokov.

Po vyskúšaní rôznych riešení som pre potreby cvičení vybral 3 kontroléry – Pox, Floodlight a OpenMUL. Pri výbere som zohľadňoval faktory zobrazené v tabuľke 1.

Kontrolér POX som vybral primárne pre jeho jednoduchosť inštalácie a ovládania. Kontrolér Floodlight som zas zvolil, pretože je stále aktívne vyvíjaný a má veľmi dobrý stav dokumentácie.

Za hlavný kontrolér pre výučbu SDN na KIS som vybral kontrolér OpenMUL. OpenMUL zahŕňa v sebe CLI rozhranie využívajúce syntax podobnú systému Cisco IOS. Naši študenti túto syntax poznajú a využívajú pri štúdiu. To je hlavný dôvod výberu tohto kontroléra. Avšak stále je otázny ďalší vývoj tohto riešenia. Posledná aktualizácia zdrojového kódu OpenMUL je datovaná na 8. septembra 2015.

| | **POX** | **Floodlight** | **OpenMUL** |
|---|---|---|---|
| Jazyk | Python | Java | C |
| Podpora verzie OpenFlow | 1.0 | 1.0/1.3 | 1.3 |
| Stav dokumentácie | Dobrý | Veľmi dobrý | Veľmi dobrý |
| Webové GUI | Áno | Áno | Áno |
| Obtiažnosť inštalácie | Ľahká | Ľahká | Ľahká |
| Obtiažnosť ovládania | Ľahká | Ťažšia | Ľahká |
| REST API | Áno | Áno | Áno |
| Je naďalej vyvíjaný? | Nie | Áno | N/A |

Tabuľka 1 Porovnanie parametrov vybraných kontrolérov

### 5.1.3 Výber hardvérového vybavenia

Čo sa týka výberu hardvérového vybavenia, zameral som sa na zariadenia v hodnote pod 100 eur. V tejto cenovej relácii som našiel smerovače od firmy Mikrotik s podporou protokolu OpenFlow vo verzii 1.0 a jednodoskové počítače ako Raspberry Pi alebo Banana Pi.

Nevýhoda jednodoskových počítačov je tá, že majú zväčša len jeden ethernetový port. Aj keď je možné do nich dokúpiť dva USB Ethernet adaptéry, ideálne by však bolo mať zariadenie s aspoň štyrmi ethernetovými portami. Tento nedostatok rieši smerovač Banana Pi BPI-R1, ktorý ma 5 ethernetových portov, a zároveň spĺňa cenovú podmienku.

Ďalšou možnosťou bol výber smerovača, na ktorý je možné nahrať operačný systém OpenWrt. Ako som spomenul v kapitole 4.3.6, jedným z kandidátov sú znova smerovače od firmy Mikrotik. Keďže Mikrotik smerovače podporujú OpenWrt systém a natívne aj OpenFlow 1.0, rozhodol som sa pre zariadenie od tejto firmy.

Zo širokej škály Mikrotik zariadení som si vybral produkt Routerboard RB951Ui2HnD v hodnote 50 eur. RB951Ui-2HnD disponuje 600Mhz procesorom a dostatočne veľkou 128MB pamäťou. Postup a výsledky implementácie protokolu OpenFlow vo verzii
1.3 do zariadenia RB951Ui-2HnD sú spísané v kapitole 6.

### 5.1.4 Výber operačného systému

Výber operačného systému nebol zložitý. Išlo o výber vhodnej distribúcie operačného systému Linux, ktorý má podporu prepínača Open vSwitch. Taktiež bolo nutné preveriť, či tento operačný systém dokáže spustiť rôzne kontroléry ako OpenMul, Floodlight, OpenDayLight a pod. Tieto požiadavky úspešne spĺňa operačný systém Ubuntu.

### 5.1.5 Výber hypervizora

Na KIS je zaužívaná práca s hypervizorom Oracle VirtualBox, ktorý je nainštalovaný na počítačoch v učebniach KIS pod systémom Debian. Pre naše účely budeme potrebovať, aby bolo možné na počítačoch spustiť 3 virtuálne servery – Windows, Mininet a Ubuntu. Keďže sa nenašla závažnejšia prekážka pre prevádzkovanie týchto serverov vo VirtualBoxe, nie je nutná aktualizácia programového vybavenia samotných počítačov v učebniach KIS.

## 5.2 Výber a zariadenie laboratória na KIS

Po dohode s vedúcim práce bola pre účely vyučovania SDN vybraná učebňa B301 na KIS. Hlavná myšlienka SDN laboratória je mať k dispozícii softvérové aj hardvérové SDN riešenia na jednom mieste. Preto je nutné spraviť návrh ich nasadenia a použitia v laboratóriu.

### 5.2.1 Hardvérové vybavenie laboratória

Na hardvérové vybavenie laboratória som vybral Mikrotik smerovače s implementovaným Open vSwitch prepínačom (pozri kapitola 6). V učebni je 10 počítačov a pri práci vo dvojiciach by laboratórium mohlo byť vybavené približne 5-6timi Mikrotik smerovačmi (napríklad RB951Ui-2HnD) tak, aby na každú dvojicu vyšiel jeden smerovač. Tieto smerovače by bolo najlepšie umiestniť do racku v zadnej časti miestnosti.
Problémom je, že smerovače sú malé a nedajú sa upevniť do racku, čiže jedna možnosť je ich voľne položiť na existujúce zariadenia v racku. Druhou možnosťou je kúpiť špeciálny tzv. rack mount adapter (web: *http://www.balticnetworks.com/mikrotik-rackmountadapter-for-routerboard-260-750-950-series.html*), ktorý umožní 3 takéto smerovače rady
260, 750, 950 pripevniť do racku.

Mikrotik smerovače budú použité na prepojenie virtuálnych servervov spustených na fyzických počítačoch v laboratóriu s SDN kontrolérmi. Prvý port každého Mikrotik smerovača bude použitý na komunikáciu s SDN kontrolérom prostredníctvom pripojenia do lokálnej siete katedry. Ostatné porty smerovača budú použité na pripojenie fyzických počítačov prostredníctvom patch panelu umiestneného v racku.

### 5.2.2 Softvérové vybavenie laboratória

Na počítačoch v miestnosti B301 je nainštalovaný hypervizor Oracle VirtualBox, pod ktorým je možné spustiť akékoľvek SDN riešenie vo virtuálnom serveri.

Pre potreby výučby budú potrebné 3 virtuálne servery. Prvý virtuálny server bude predstavovať emulátor Mininet. V prostredí Mininet budú študenti vytvárať vlastné virtuálne topológie. Druhý virtuálny server bude systém Ubuntu v úlohe SDN kontroléra. SDN kontrolér bude mať za úlohu spravovať Open vSwitch prepínače v Mininete, poprípade Open vSwitch prepínač implementovaný v Mikrotik smerovači. Tretí virtuálny server bude systém Windows, ktorý bude slúžiť ako hlavné pracovné prostredie. Zo systému Windows budú študenti ovládať prostredie Mininet.

Všetky tieto virtuálne servery budú pripojené do lokálnej siete katedry, čiže budú mať konektivitu medzi sebou, aj konektivitu s Mikrotik smerovačmi.

## 5.3 Ďalšie možnosti skúmania SDN na KIS

SDN ponúka takmer neobmedzené možnosti pre obohatenie výučby na KIS. Pri riešení diplomovej práce som sa stretol s riešeniami, ktoré by mohli pomôcť rozšíriť výučbu SDN, resp. by mohli byť aplikované ako návrhy na záverečné práce.

Prvý postreh sa týka grafického rozhrania Avior vo verzii 2.0 (web: *http://sdn.marist.edu/avior).* Avior 2.0 podstatne zjednodušuje prácu s kontrolérom cez webové rozhranie, čo môže pomôcť vylepšiť výučbu SDN. Aktuálne Avior 2.0 podporuje kontroléry ako OpenDayLight, Floodligh, Ryu a OpenMUL. Keďže počas riešenia práce mi nezostalo viac času na preštudovanie Avior 2.0 rozhrania, navrhujem, aby študenti počas projektovej výučby preskúmali jeho možnosti.

Na KIS je implementovaná cloudová platforma OpenStack. Ďalšia možnosť skúmania by mohla spočívať v integrácií platformy OpenContrail do OpenStacku na KIS. OpenContrail riešenie je spomenuté v kapitole 4.4.2 v rámci SDN riešenia Juniper Contrail. Táto kombinácia platforiem by mohla priniesť mnoho výhod do vyučovacieho procesu na KIS.

Ďalším zaujímavým návrhom na skúmanie je technológia POF (Protocol Obvious Forwarding) od spoločnosti Huawei. Toto open source riešenie je dostupné na adrese *http://www.poforwarding.org/*. POF sa zameriava na vylepšenie protokolu OpenFlow o flexibilnejší programovací model, v ktorom prepínače nie sú limitované preddefinovanými protokolmi alebo preposielacími pravidlami.

Na koniec by som chcel spomenúť kontrolér ONOS, ktorý je popísaný v kapitole 4.2.5. ONOS ponúka množstvo spôsobov použitia s rôznymi sieťovými technológiami a protokolmi. ONOS je veľmi pestrý kontrolér, ktorý odporúčam na podrobnejšie preskúmanie pre účely vyučovania SDN na KIS.

# 6 Implementácia protokolu OpenFlow 1.3 do Mikrotiku

Mojím cieľom bolo implementovať podporu protokolu OpenFlow vo verzii 1.3 do zariadenia RouterBoard RB951Ui-2HnD. Pre splnenie tejto požiadavky bolo nutnosťou na zariadenie nainštalovať operačný systém OpenWrt.

K dispozícii sú dve možnosti ako spustiť OpenWrt na Mikrotik zariadení. Prvá možnosť je nainštalovať systém na internú flash pamäť. Druhá možnosť je využiť novú funkciu systému RouterOS tzv. MetaRouter (od verzie 3.21), ktorý umožňuje spustiť OpenWrt ako virtuálnu inštanciu.

Ako východiskové riešenie pre podporu protokolu OpenFlow som si zvolil softvérový prepínač Open vSwitch, ktorý bolo potrebné integrovať do systému OpenWrt.

## 6.1 Problémové riešenie

Zvolil som si aktuálnu stabilnú verziu OpenWrt s názvom Chaos Calmer (15.05), balík Open vSwitch vo verzii 2.3.0 pre verziu Chaos Calmer a operačný systém Ubuntu 14.04, na ktorom som OpenWrt pre platformu Mikrotik skompiloval.

Po spustení systému OpenWrt na zariadení RB951Ui-2HnD som začal s testovaním. Prvý problém, ktorý som musel vyriešiť, sa týkal rozhraní smerovača. Systém rozpoznával len rozhranie eth0 (port 1 na zariadení) a rozhranie eth1 (porty 2-5 na zariadení), ktoré predstavovalo klasický prepínač. Pre naše účely bolo nevyhnutné mať 5 konfigurovateľných rozhraní odpovedajúcich piatim portom smerovača. Riešenie bolo rozhranie eth1 rozdeliť do viacerých VLAN sietí.

Do konfiguračného súboru */etc/config/network* som pridal nasledovné riadky.

```
config switch
        option name 'switch0'
option reset '1'        option
enable_vlan '1'
        option enable_learning '0'

config interface 'lan1'
        option ifname 'eth1.1'
        option proto 'static'
```

```
config interface 'lan2'
        option ifname 'eth1.2'
        option proto 'static'

config interface 'lan3'
        option ifname 'eth1.3'
        option proto 'static'

config interface 'lan4'
        option ifname 'eth1.4'
        option proto 'static'

config switch_vlan      option
device 'switch0'        option
vlan '4'        option vid '4'
        option ports '0t 1'

config switch_vlan      option
device 'switch0'        option
vlan '3'        option vid '3'
        option ports '0t 2'

config switch_vlan      option
device 'switch0'        option
vlan '2'        option vid '2'
        option ports '0t 3'

config switch_vlan      option
device 'switch0'        option
vlan '1'        option vid '1'
option ports '0t 4'
```

Vytvoril som tak 4 nové rozhrania (eth1.1 – VLAN 1, eth1.2 – VLAN 2, eth1.3 – VLAN 3, eth1.4 – VLAN 4), pričom každé rozhranie prislúchalo práve jednému portu na smerovači.

Všetko nasvedčovalo tomu, že mám k dispozícii 5 plnohodnotných, logicky oddelených rozhraní. Nastal však druhý problém, ktorý sa týkal aplikácie Open vSwitch a vytvárania bridge rozhraní v Linuxe všeobecne. Keď som vytvoril bridge rozhranie z viacerých „podrozhraní“ napr. spojením eth1.3 a eth1.4, tak komunikácia sa začala rozpadávať. Po odchytení komunikácie bolo možné vidieť, že niektoré pakety sa strácajú. Po preskúmaní všetkých možností som usúdil, že tento problém nevyriešim a môžem ho pokojne označiť za „bug“ samotného OpenWrt systému. Aj keď balík Open vSwitch, ktorý som skompiloval pre verziu Chaos Calmer bol stabilný a plne funkčný, musel som sa vrátiť k pôvodnému systému zariadenia RouterOS.

## 6.2 Výsledné riešenie

Druhou možnosťou ako prevádzkovať systém OpenWrt na Mikrotik zariadení je spustiť ho ako virtuálnu inštanciu pomocou funkcie Metarouter v systéme RouterOS. Zvolil som si staršiu stabilnú verziu OpenWrt Attitude Adjustment (12.09), rovnaký balík Open vSwitch vo verzii 2.3.0 a operačný systém Ubuntu 14.04, na ktorom som OpenWrt pre platformu Metarouter skompiloval. Skompilovaný systém OpenWrt s Open vSwitchom pre platformu Metarouter je priložený na DVD k diplomovej práci.

Po spustení systému OpenWrt cez funkciu Metarouter bolo dôležité overiť stabilitu bežiaceho systému, pretože funkcia Metarouter je vysoko experimentálna a nie moc stabilná. OpenWrt verzia Attitude Adjustment pre platformu Metarouter sa mi osvedčila ako veľmi stabilná. Systém ani raz nespadol za 10 hodín prevádzky. Avšak balík Open vSwitch skompilovaný pre túto platformu je miestami nestabilný. Ak aplikácia nečakane spadne stačí ju reštarovať príkazom */etc/init.d/openvswitch restart*. Napriek tomu je toto riešenie plne funkčné a osvedčilo sa mi ako vyhovujúce pre potreby diplomovej práce.

# Záver

Hlavným cieľom práce bolo vyhotoviť koncept vyučovania SDN v rámci študijného programu Aplikované sieťové inžinierstvo v predmete Integrácia sietí. K naplneniu tohto cieľa som na začiatku vypracoval analýzu súčasného stavu vyučovania SDN vo svete. Ďalej som sa teoreticky a prakticky oboznámil s technológiou SDN. Keď som získal dostatočne veľa informácií, vypracoval som samotný návrh vyučovania SDN.

Ako podklad pre návrh vyučovania SDN som vybral potrebné komponenty. To pozostávalo z výberu virtuálneho SDN prepínača Open vSwitch, kontroléra OpenMUL, operačného systému Ubuntu, hypervizora VirtualBox a hardvérového zariadenia značky Mikrotik.

Do Mikrotik zariadenia som implementoval prepínač Open vSwitch prostredníctvom operačného systému OpenWrt. OpenWrt systém je prevádzkovaný v Mikrotik zariadení ako virtuálna inštancia cez jeho funkciu Metarouter. Týmto som dosiahol v zariadení plnú podporu protokolu OpenFlow 1.3.

Ďalej som navrhol zariadenie KIS laboratória B301, v ktorom by mala prebiehať výučba SDN. Toto laboratórium by mohlo pozostávať z komponentov, ktoré som uviedol vyššie. Do návrhu som začlenil, kde budú komponenty môjho SDN riešenia umiestnené, ako a za akým účelom budú používané.

V poslednej fáze riešenia diplomovej práce som navrhol a vypracoval podklady pre prednášky a cvičenia v dvoch verziách – verzia pre výučbu SDN na celý semester a verzia pre výučbu SDN na polovicu semestra. Pri vypracovaní praktických úloh pre cvičenia som využil emulačné prostredie Mininet, v ktorom je možné vytvoriť ľubovoľnú SDN topológiu.

Na koniec som uviedol ďalšie možnosti skúmania SDN na KIS s využitím vo vyučovaní.