

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Димитър Николов Тодоров

**МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА РАВНОМЕРНО
НАТОВАРВАНЕ И ПОВИШАВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА
УСЛУГИТЕ В СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАНИ МРЕЖИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „Доктор”**

**по докторска програма „Системно програмиране“ към
професионално направление „Комуникационна и компютърна техника“**

Научен ръководител: Проф. д-р инж. Христо Георгиев Вълчанов

Рецензенти:

- 1.**
- 2.**

Варна, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден на 15.10.2025 г. в катедра „Компютърни науки и технологии“ и насочен за защита.

Автор: инж. Димитър Николов Тодоров

Заглавие: Методи и средства за равномерно натоварване и повишаване на качеството на услугите в софтуерно дефинирани мрежи

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Димитър Николов Тодоров

**МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА РАВНОМЕРНО
НАТОВАРВАНЕ И ПОВИШАВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА
УСЛУГИТЕ В СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАНИ МРЕЖИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „ДОКТОР”**

Варна, 2025 г.

Дисертационният труд съдържа 140 страници, включително 30 фигури, 46 таблици и 4 приложения, оформени в 3 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 137 заглавия, от които 1 на кирилица и 136 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на Г. от Ч. в на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №/..... Г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

Съвременните изследвания в областта на равномерното натоварване и повишаване на качеството на услугите в SDN базирани мрежи, все повече се фокусират върху оптимизация на маршрутизацията, чрез прилагане на класически алгоритми и методи, както и прилагането на допълнителни мрежови параметри при определяне на маршрутите. Предлагат се подобрени динамични алгоритми с множество маршрути, които използват класически методи за избор на маршрути, с цел по-добро балансиране на натоварването и по-кратко време за реакция в мрежата. Провеждат се подробни сравнителни оценки на различни топологии за среди с множество домейни в SDN инфраструктури, като се акцентира върху тяхната мащабируемост и устойчивост. Също така, се изследват класическите алгоритми за маршрутизация, включително Дейкстра, Белман-Форд и Флойд-Уоршал, като се демонстрира тяхната ефективност в SDN среди, чрез измерване на ключови показатели, като средна латентност, разсъгласуваност и пропускателна способност. Освен това, в контекста на мултимедийни приложения, се анализира представянето на различни маршрутизиращи стратегии в SDN, използвайки реалистични условия и оценявайки параметри като PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) и загуба на пакети за оценка на качеството на услугата.

Развитието на ефективни маршрутизиращи механизми в SDN е от критично значение за реализирането на визията за самоуправляваща се мрежа – интелигентна, мащабируема и устойчива на натоварване комуникационна инфраструктура, способна да отговори на динамичните изисквания на съвременните и бъдещите дигитални приложения.

2. Цели и задачи на изследването

Целта на дисертационния труд е изследване и разработване на методи и средства за повишаване на QoS в SDN базирани мрежи. Акцентира се върху изследване влиянието на алгоритмите за статично и динамично маршрутизиране на трафика, върху качеството на услугите предоставяни при тях.

Задачите, които са формулирани за постигане на поставената цел са следните:

- Да се дефинира система от показатели за прецизно оценяване ефективността на алгоритми за маршрутизация в софтуерно дефинирани мрежи;
- На база дефинираната система от показатели за софтуерно дефинирани мрежи, да се предложи статичен маршрутизиращ алгоритъм, който открива връзките между маршрутизиращите устройства, чрез изпращане на инструкции за тяхната конфигурация, като спазва изискванията за балансирано разпределяне на трафика;
- На база дефинираната система от показатели за софтуерно дефинирани мрежи, да се предложи динамичен маршрутизиращ алгоритъм, който управлява мрежовия трафик според натоварването на различните мрежови пътища, като по този начин предоставя по-добри QoS показатели на мрежата.

3. Обект и предмет на изследване

Обект на изследването са софтуерно дефинирани мрежи.

Предмет на изследването са алгоритмите за статично и динамично маршрутизиране на трафика при SDN мрежи и механизмите за разпределяне на мрежовото натоварване.

4. Методи на изследване

Използвани са емпирични методи като наблюдение, сравнение, експериментирание за изследване влиянието на алгоритмите за статично и динамично маршрутизиране на трафика върху качеството на услугите при SDN мрежи. На база изследваното влияние на класически алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика, при SDN мрежи е формулирана необходимостта от подобряване на механизмите за равномерно разпределение на трафика, с цел предоставяне на по-добро качество на услугите. Като емпирико-теоретичен подход за изследване и оценка както на съществуващите алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика, така и на предложените в дисертационния труд, е използвана симулация.

5. Място на изследване

Изследванията са проведени в лабораториите на катедра КНТ при ТУ – Варна.

6. Научна новост на изследването

Резултатите от проведените, в съответствие с целта и задачите на дисертационния труд, теоретични и експериментални изследвания се свеждат до следните основни приноси:

Предложен е алгоритъм за статично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи, при който се спазват изискванията за балансирано натоварване на мрежовия трафика и се осигуряват надеждни показатели за QoS на мрежата.

Предложен е алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи, при който се постига ефективно управление на мрежовия трафик, според натоварването на различни мрежови пътища и се осигуряват надеждни показатели за QoS на мрежата.

Дефинирана е система от показатели за оценяване ефективността на маршрутизиращи алгоритми.

Дефиниране е система от показатели за оценяване на SDN контролери за изследване на маршрутизиращи алгоритми за балансирано разпределение на мрежовия трафик.

Разработен е SDN контролер за изследване на маршрутизиращи алгоритми за балансирано разпределение на трафика.

7. Практическа ценност на изследването

Предложените системи от показатели за статични и динамични маршрутизиращи алгоритми могат да бъдат приложени, както за анализ на проблемите в алгоритмите за маршрутизиране при SDN мрежи, така и за оценка на влиянието им върху качеството на услугите. Дефинираната система от показатели за сравнение на SDN контролери може да бъде използвана като основно средство за оценка при провеждане на мрежови изследвания от този тип. Разработената система от качествени критерии и техните количествени индикатори за анализ и оценка на алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи, предоставя възможност за цялостно оценяване на ефективността на различни мрежови инфраструктури.

Предложените алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика при SDN са приложими за подобряване качеството на услугите при този тип мрежи. Извършените изследвания на статични маршрутизиращи алгоритми доказват, че предложният алгоритъм подобрява времето необходимо за откриване на мрежова топология, броя на обменени пакети при откриване на мрежова топология, средното мрежово закъснение и мрежовите трептения при пакети с голям обем. Извършените изследвания на динамични маршрутизиращи алгоритми доказват, че предложният алгоритъм подобрява времето за откриване на мрежова топология Abilene, броя на обменени пакети при откриване на циклична, линейна и дървовидна мрежова

топология, както и средното мрежово закъснение и мрежовите трептения при обмен на пакети с голям обем. Разработеният SDN контролер позволява изследване функционалността на нови алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика при мрежи от този тип.

8. Аprobация на изследването

Междинните резултати от теоретичните и експериментални изследвания са докладвани на три международни конференции в България и са отразени в една статия в списание.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. Анализ на методи и средства за маршрутизация и повишаване на качеството на обслужване при SDN мрежи

В първа глава е разгледана еволюцията на компютърните мрежи и преминаването от традиционна мрежова архитектура към виртуализация на мрежови функции и софтуерно дефинирани мрежи. Разгледани са архитектурите на NFV и SDN, както и протокола за управление на SDN – OpenFlow. Представена е комбинирана архитектура SDN-NFV и нейното значение за съвременните мрежови инфраструктури. Анализирани са подходите за осигуряване на качество на услугите, както и методите за балансирано натоварване на мрежите. Разгледани са алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика, като е направено обобщение на основните им предимства и недостатъци в контекста на управлението на трафика в SDN мрежи.

Изводите, които могат да се направят на основата на анализа, представен в първа глава са:

- SDN и NFV са нови технологии, които навлизат все повече в съвременните мрежови инфраструктури. Те позволяват изграждането и управлението на гъвкави решения, посредством унифициран модел за управление. Използването на NFV позволява намаляване на корпоративните и оперативни разходи, чрез виртуализация на мрежови функции, а SDN предоставя глобален поглед над прилежащата мрежова инфраструктура, както и механизми за управление и наблюдение на мрежовите ресурси. Също така, SDN дава възможност за изучаване и надграждане на маршрутизиращите механизми посредством Southbound интерфейси;
- Нарастващото Интернет потребление в световен мащаб увеличава очакванията на потребителите за получаване на подходящо качество на услугите, което се определя от максималните нива на закъснение, степента на загуба при предаване на пакети, както и от пропускателната способност на мрежата. Основните ограничения, които поставят традиционните компютърни мрежи за предоставяне на високо QoS е липсата на глобален поглед над мрежовите топологии, който да следи промените в трафика и да променя конфигурациите на мрежовите устройства при необходимост. Има предложени решения, които се възползват от мрежовата архитектура на SDN и предлагат различни подходи за предоставяне на QoS. Те са базирани на механизми, които следят за предоставяне на заявеното от потребителя качество на услуги, посредством приоритизация на трафика за конкретна услуга, но не и на всички потоци от данни, които са предназначени до крайния потребител. От тази гледна точка, голям практически интерес представлява създаването на нови алгоритми и механизми, които да предоставят надеждни нива на QoS за всички потоци от данни;
- Нарастващият брой на устройства и услуги в Интернет, както и постоянно увеличаващата се комуникация, водят до високо натоварване на мрежите, особено към определени услуги с високо потребителско потребление. За да се намали вероятността за изчерпване на капацитета на мрежовите връзки, в зависимост от натовареността им, са предложени решения, които са основани на мрежовата архитектура SDN. Те са базирани на механизми за разпределение на натовареността между множество мрежови маршрути, посредством традиционни и евристични алгоритми, които периодично извличат мрежова информация или предвиждат възможността за потенциални натоварвания. Но при тези решения е

възможно да настъпи претоварване в SDN контролера, поради сложната логика за изчисление на натовареността на мрежовите връзки;

- Предложените алгоритми за статично маршрутизиране на трафика в SDN използват статични тегловни коефициенти, посредством които предоставят един и същ маршрут между една и съща двойка източник и дестинация. Поради тази причина е възможно да настъпи претоварване на някои от пътищата или маршрутизиращите устройства, което да доведе до закъснение или загуба на пакети, което от своя страна да наруши изискванията за QoS. Това води до необходимостта от разработване и изследване на нови алгоритми и механизми за статично маршрутизиране, които имат възможност да предоставят алтернативни маршрути при изчерпване на капацитета на мрежовите връзки;
- Съществуващите алгоритми за динамично маршрутизиране на трафика в SDN използват механизми за следене на натовареността, както на мрежовите връзки, така и на мрежовите устройства. По този начин те могат да предоставят алтернативни маршрути при изчерпване на капацитета на мрежовите връзки или при тяхното отпадане. Съществен недостатък на тези алгоритми е, че при тях не се вземат предвид средните стойности за времето на закъснение на пакетите от мрежовите устройства, количеството на пропускателна способност на мрежовите устройства и връзките между тях, както и броя на отпадналите пакети. Необходимо е разработване и изследване на нови алгоритми за динамично маршрутизиране, които предоставят балансирано натоварване;

Глава 2. Методи и средства за повишаване на качеството на услугите в софтуерно дефинирани мрежи

Очакваното увеличение на мрежовия трафик, както в центровете за данни, така и в глобален мащаб, а също така и на броя устройства с Интернет връзка, налага разработване на нови маршрутизиращи алгоритми, които да предоставят по-добро оползотворяване на мрежовата топология. Същевременно, тези алгоритми е необходимо да могат да предоставят достатъчно добри показатели за QoS и QoE, които да удовлетворят нуждите на крайните потребители.

Предоставянето на оптимален маршрут за пренос на мрежови пакети е основна цел на маршрутизиращите алгоритми, които обикновено използват един параметър като тегловен коефициент, което от своя страна води до неефективно маршрутизиране при високо натоварване. Използването на множество параметри също не гарантира адекватност, ако не се отчитат динамичните промени в трафика, което може да доведе до претоварване на мрежата, загуба на пакети и влошено качество на обслужване. Бързото адаптиране на маршрутите при промени в мрежата е от съществено значение за услуги с висока натовареност и чувствителност към закъснения като IoT, видео стрийминг и VoIP. Лекотата на изчисленията и бързото маршрутизиране са критични за прилагане в среди с ограничен хардуерен капацитет, включително центрове за данни.

Предлаганите алгоритми в дисертационния труд имат за основна цел да предоставят балансирано разпределение на мрежовия трафик, като спазват необходимите изисквания за това, както и да предоставят по-добри QoS показатели на мрежата и по този начин да удовлетворят нуждите на потребителите.

2.1. Предлаган алгоритъм за статично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи

Едно от основните изисквания при статичните маршрутизиращи алгоритми е предоставянето на един и същ маршрут при обмен на пакети между един хост към друг, независимо от мрежовото натоварване. От друга страна, балансираното разпределение на

трафика изисква пренасочване от натоварени към по-слабо натоварени пътища, за да се избегне претоварване и да се осигури достатъчен капацитет. Същевременно, маршрутизиращият алгоритъм трябва и бързо да адаптира маршрутите при промени в мрежовата топология за да се осигурят по-добри показатели за QoS.

Прилагайки горепосочените изисквания и възползвайки се от основния набор от инструменти за управление, предоставени от OpenFlow, могат да се определят следните характеристики за статичния маршрутизиращ алгоритъм:

- предоставя винаги един и същ маршрут при комуникация между два хоста, който е получен по време на първото установяване на връзка при обмена на ARP съобщения;
- предоставя балансирано разпределение на мрежовия трафик, като то се осъществява още при първоначалното установяване на връзка с отсрещната страна – по време на обмяната на ARP съобщения;
- намалява натоварването на маршрутизаторите, генерирано от намирането на маршрути за преминаващите пакети, като прехвърля управляващата логика за съхранение на маршрутните таблици и маршрутизирането на пакети към SDN контролера;
- премахва необходимостта от изчислението на маршрути при обмена на пакети, както от страна на маршрутизаторите, така и от страна на SDN контролера.

Прехвърлянето на цялата управляваща логика към SDN контролера, позволява по-голяма гъвкавост в управлението на преминаващите пакети. По този начин има възможност за по-детайлната обработка на ARP съобщенията, посредством която се осъществява откриването на връзките за всеки хост към всеки един маршрутизатор. Информацията за връзките се съхранява в набора от данни за съответния маршрутизатор в паметта на контролера, която в последствие се използва за маршрутизирането на преминаващите пакети.

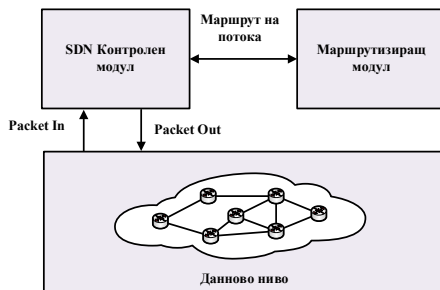
Балансираното разпределение на трафика и намирането на маршрут за обменяните между отделните хостове пакети се осъществява още при първоначалната размяна на ARP съобщенията. Това се извършва на базата на правилото „най-бързият печели“, а именно маршрутът, който най-бързо обработи ARP съобщението и върне отговор обратно към изпращача, ще бъде използван за последващ обмен на пакети. Следователно може да се приеме, че най-слабо натоварените маршрутизатори ще бъдат използвани за обработката на преминаващите пакети и те ще бъдат прехвърлени през връзките с най-голям капацитет на пропускателна възможност, като по този начин могат да се осигурят по-добри показатели за QoS.

Предлаганият в дисертационния труд алгоритъм за статично маршрутизиране обединява фазите за откриване на мрежовите връзки, балансираното разпределение на мрежовия трафик и намирането на маршрути за предаваните пакети, като по този начин осигурява намален мрежови трафик и леки маршрутизиращи операции. Това позволява приложението му, както в големи, така и в малки центрове за данни с ограничени хардуерни възможности.

2.1.1. Структура на системата

На фигура 2.1 е представена структура на системата, реализираща предложени механизъм за статично маршрутизиране. Системата се състои от два основни модула:

- SDN контролер;
- Модул за изчисление на маршрута.



Фиг. 2.1. Структура на системата реализираща статично маршрутизиране

Контролният модул на SDN управлява комуникацията между контролера и мрежовите устройства, като съхранява информация за тях и за маршрутните таблици в база данни за глобалния мрежови изглед. Връзката между контролера и маршрутизатора се установява, чрез *hello* пакети, след което контролерът приема заявки за маршрутизиране и периодично изпраща *echo* пакети, за да следи достъпността на устройствата.

Маршрутизиращият модул събира данни за свързаността на мрежовите устройства чрез ARP пакети, които му позволяват да изгради маршрутни таблици. Те се използват за избор на маршрути с минимално закъснение, висока пропускателна способност, голям капацитет и ниско натоварване на маршрутизаторите.

При заявка за маршрутизиране на пакет, маршрутизиращият модул извлича адреса на дестинацията, намира следващия хоп от вече наличните таблици и подава информацията на контролера за пренасочване на пакета. По този начин се осигурява оптимален път без необходимост от изчисление на маршрут и без нужда от информация за текущата натовареност на мрежата.

2.1.2. Маршрутизиращ процес

Контролерът използва ARP пакетите, обменяни между хостовете, за да попълни маршрутните таблици на маршрутизаторите. *Broadcast* ARP съобщенията служат за установяване на MAC адреса и порта на източника, а *unicast* ARP съобщенията – за установяване на MAC адреса на получателя и съответния порт. След установяване на адреса на източника, контролерът изпраща инструкции до маршрутизаторите за препращане на пакетите към крайната дестинация, като се основава на вече събраната информация от предишни *broadcast* ARP пакети.

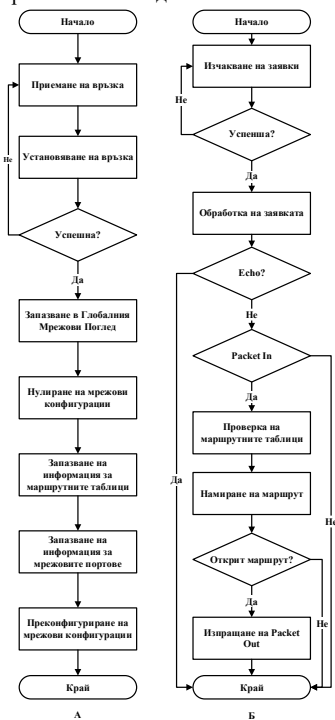
При получаване на *Packet In* съобщение с *broadcast* ARP пакет, контролерът записва MAC адреса и идентификатора на порта на маршрутизатора, на който е получен пакета. След това, указва на маршрутизатора да препрати пакета през всички портове, освен през порта от който е получил съобщението. Когато пакетът достигне крайната дестинация, хостът връща *unicast* ARP отговор с MAC адреса си. При последващо *Packet In* съобщение към контролера с известен адрес на дестинацията, контролерът проверява маршрутните таблици и определя точния порт за препращане към крайната дестинация.

В случай, че прилежащата мрежовата топология съдържа циклични връзки, контролерът прилага логика за игнориране на вече обработени ARP съобщения, за да избегне безкрайно

обработване на едно и също съобщение. Тъй като алгоритъмът разчита на преминаващите ARP съобщения за изграждане на маршрути, при отпадане на маршрутизатор или промяна в топологията, е необходим нов обмен на ARP пакети, за да се обновят маршрутните таблици.

2.1.3. Блок схема на алгоритъма за статично маршрутизиране

На фигура 2.2 са представени блок схемите за откриване на връзките между мрежовите устройства и предложеният алгоритъм за статично маршрутизиране. Първо е необходимо да се установи връзка между контролера и маршрутизаторите, посредством обмен на *Hello* съобщения (Фиг. 2.2-А). Тези съобщения съдържат данни за максималната поддържана версия на *OpenFlow* протокола, като при несъответствия се прилага автоматичен избор на най-високата съвместима версия. След успешна инициализация на връзката, контролерът изпраща *Features* заявка за идентификация на маршрутизатора и определяне на неговите функционални възможности, като получената информация се съхранява в базата данни за глобалния мрежови изглед.



Фиг. 2.2. Откриване на връзките между мрежовите устройства – А и блок схема на алгоритъма за статично маршрутизиране в SDN – Б

След успешно установяване на връзка, се извършва инициализация на конфигурациите, чрез изпращане на *Flow Mod Reset* съобщение от контролера към маршрутизаторите, което изчиства съществуващите настройки. Контролерът извлича информация за маршрутните таблици и наличните мрежови портове, посредством *Table Stats* и *Port Stats* заявки, като получените данни се съхраняват в глобалния мрежови изглед. След това, контролерът изпраща *Flow Mod*

инструкция към маршрутизаторите, която ги конфигурира да препращат всички входни пакети към контролера за определяне на маршрута (Фиг. 2.2-Б).

При обработката на входящи *Packet In* съобщения, контролерът идентифицира ARP пакети с *broadcast* адрес, регистрира MAC адреса на изпращача и идентификатора на порта на маршрутизатора, получил съобщението, и указва на маршрутизатора да препрати съобщението през всички портове, с изключение на входния и този, предназначен за комуникация с контролера. Освен това контролерът разполага с механизъм за предотвратяване на циклично маршрутизиране, чрез проверка за дублиращи се двойки MAC адрес и порт, при което вече обработени пакети се отхвърлят.

При опит за установяване на комуникация между два хоста, всеки пакет се проверява и маршрутизира от контролера, като за всеки хоп, маршрутизаторът изпраща *Packet In* съобщение. Контролерът извлича адреса на дестинация, съпоставя го с маршрутните таблици и определя точния порт за препращане, като предоставя инструкции към маршрутизатора за достигане на крайната точка.

По този начин контролерът съхранява маршрутната информация за всеки хост във всеки един от маршрутизаторите в мрежовата топология, като така се намалява допълнителното мрежово натоварване генерирано от LLDP при откриване на мрежовата топология.

2.2. Предлаган алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи

Един от основните проблеми при динамичните маршрутизиращи алгоритми е управлението на трафика в зависимост от текущото натоварване на мрежовите връзки, с цел предотвратяване на изчерпване на пропускателната способност и минимизиране на забавяния или загуби на пакети. Това е критично за поддържане на качеството на услугите в мрежата. Друг важен аспект е правилният избор на мрежови параметри, които да позволят ефективно пренасочване на трафика по оптимални маршрути.

Традиционно в динамичните маршрутизиращи алгоритми за балансирано разпределение на трафика се използват параметри като:

- капацитет и пропускателна способност на връзката;
- сума на потоците от данни за определен интервал от време, преминаващи през маршрутизатора;
- брой битове за определен интервал от време, обработени от възела;
- процентно съотношение на успешно получените пакети спрямо всички обработени пакети.

Често използваните мрежови параметри се оказват недостатъчни или непълни за точното определяне на текущото натоварване на връзките и възлите, като също така не отразяват възможните пикове в трафика. Това води до неточности при изчисляването на тегловните коефициенти за маршрутизация, което от своя страна причинява неравномерно натоварване на маршрутите и маршрутизаторите. В резултат, ефективното разпределение на мрежовия трафик не може да бъде постигнато.

За постигане на прецизен избор на маршрути и ефективно разпределение на мрежовия трафик е необходимо използването на комплексен набор от мрежови параметри, които отразяват както текущото състояние на връзките, така и натоварването на маршрутизаторите. За тази цел са предложени следните мрежови параметри:

- **време за получаване на обратен отговор от маршрутизатора;**
- **пропускателна способност на маршрутизатора и връзките;**
- **скорост на честотната лента на връзките;**

- **капацитет на пропускателната способност на маршрутизатора;**
- **количество отпаднали пакети.**

За да се намали вероятността от въздействие на случайни краткосрочни колебания върху част от използваните параметри са приложени формулите за пълзяща средна стойност (2.1) и пълзяща средна тегловна стойност (2.2).

$$R(t) = \frac{n+1}{R(t) + R(n+1)}, \quad (2.1)$$

където $R(t)$ е хармоничната последователност, която е последователност от измерванията за пропускателната способност на мрежовите връзки, където $t = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

$$LR(t) = 0,8 \times LR(t) + 0,2 \times LR(t+1), \quad (2.2)$$

където $LR(t)$ е претеглена хармонична последователност, която е последователност от измерванията за времето за получаване на обратен отговор от маршрутизатора и пропускателната способност на маршрутизатора, където $t = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

Получаването на параметъра за времето за получаване на обратен отговор от маршрутизатора се осъществява посредством (2.2) и обработката на *echo* съобщенията, които се обменят между маршрутизатора и контролера, като се измерва времето от изпращане на *echo* съобщение до връщането на *echo reply* от маршрутизатора.

Параметърът за пропускателна способност на връзките отразява пропускателната способност на връзката с контролера (CT) и пропускателната способност на останалите връзки (ET) към маршрутизатора. Получаването на параметъра се осъществява посредством (2.1), където за CT се прилагат мрежовите показатели получени от обработката на *echo reply* съобщенията изпратени от маршрутизатора към контролера, а за ET се използват извлечените мрежови показатели на връзките за обменените байтове за определен интервал от време.

За да бъде получен параметърът за пропускателната способност на маршрутизатора (ST), се прилага формула (2.2), като моментното състояние на ST се определя чрез (2.3).

$$ST(t+1) = 0,2 \times CT + 0,8 \times \frac{\sum_{i=1}^n ET_i}{n} \quad (2.3)$$

С по-нисък приоритет се взима предвид пропускателната способност на CT , а с по-висок приоритет средната пропускателна способност на всички връзки. Това е необходимо, защото комуникацията между контролера и маршрутизатора е интензивна, което може да повлияе съществено на параметъра за пропускателна способност на маршрутизатора.

Параметърът за скорост на честотната лента отразява максималната скорост за предаване на пакети за дадена връзка (EBW), а параметърът за капацитет на пропускателната способност на маршрутизатора (SC) може да се дефинира чрез (2.4).

$$SC = \frac{\sum_{i=1}^n EBW_i}{n} \quad (2.4)$$

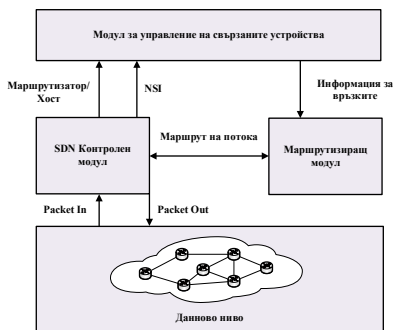
Параметърът за количество отпаднали пакети се получава посредством извлечената мрежова информация на връзките за броя пропаднали пакети при получаване и изпращане.

Прилагането на горепосочените мрежови параметри позволява реално отразяване на текущото състояние на мрежата и осигурява прецизен избор на маршрутизация на пакетите. Това води до балансирано натоварване на маршрутизаторите и връзките, като се отчита и влиянието на краткосрочни колебания в мрежовия трафик. В резултат се подобряват качеството на услугите (QoS) за крайните устройства.

Предлаганият в дисертационния труд алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика използва съвкупност от мрежови параметри, които отразяват моментното състояние, както на мрежовите пътища, така и на маршрутизаторите. Мрежовите параметри участват в процеса за намирането и предоставянето на маршрут, което от своя страна предоставя балансирано разпределение на мрежовия трафик и по-добри показатели за QoS.

2.2.1. Структура на системата

На фигура 2.3 е представена структура на системата, реализираща предложения механизъм за динамично маршрутизиране. Тя се състои от един основен модул – SDN контролен модул и два подмодула – Модул служещ за управление на свързаните устройства и Маршрутизиращ модул.



Фиг. 2.3. Структура на системата за динамично маршрутизиране

Контролният модул осигурява комуникацията с мрежовите устройства чрез OpenFlow, както и допълнителни комуникационни протоколи като LLDP и ARP. Контролният модул използва и допълнителни комуникационни пакети, чрез които събира информация за връзките и състоянието на мрежата (NSI). Получената информация се предава към останалите подмодули и се използва за изчисление на оптимални маршрути.

Модулът за управление на свързаните устройства открива и идентифицира маршрутизаторите и хостовете, чрез обработка на обменените LLDP и ARP съобщения, като съхранява и NSI данни за връзките и устройствата. Също така, модулът изчислява ключови параметри като време за получаване на обратна връзка (RTT) и пропускателна способност, както на маршрутизаторите, така и на връзките между тях.

Маршрутизиращият модул използва събраната мрежова информация, за да определи най-надеждния и ефективен маршрут между хостовете, като съчетава тегловните коефициенти на връзките и възлите. По този начин се осигурява по-добро качество на услугата (QoS) и балансирано разпределение на мрежовия трафик.

2.2.2. Маршрутизиращ процес

След установяване на връзка с маршрутизатора, контролерът изгражда глобален изглед на свързаните устройства към маршрутизатора и хостовете, чрез иницииране на изпращане на *Packet Out* съобщение с *broadcast* адрес за дестинация от маршрутизатора през всичките му отворени портове. Съобщението съдържа LLDP пакет, който включва информация за мрежовия порт, MAC адрес и уникален идентификатор на изпращащия маршрутизатор.

Когато LLDP пакетът достигне съседен маршрутизатор, той изпраща *Packet In* съобщение към контролера, който използва получената информация, за да актуализира маршрутните таблици и да създаде карта на мрежовата топология. В случаите, когато LLDP пакетите достигат хостове, те се игнорират, тъй като тези устройства не обработват съобщения от този тип.

Откриването на свързаните хостове към маршрутизаторите се реализира, чрез анализ на ARP съобщения, обменяни между хостовете. Когато източникът не разполага с MAC адреса на дестинацията, се инициира ARP заявка с *broadcast* адрес. При получаване на такова съобщение маршрутизаторът изпраща *Packet In* към контролера за инструкции за обработка. Контролерът извлича Ethernet сегмента, проверява адреса за дестинация и типа на пакета. При наличие на ARP съобщение с *broadcast* адрес за дестинация, се проверява дали MAC адресът на източника е регистриран в глобалния мрежови изглед. Ако липсва запис, MAC адресът и съответният мрежови порт на маршрутизатора се добавят в базата данни на глобалния мрежови изглед. След това контролерът инструктира маршрутизатора да препрати пакета през всички отворени мрежови портове, с изключение на входния порт и този, предназначен за комуникация с контролера.

При получаване на ARP отговор от дестинацията, съдържащ MAC адреса на източника, маршрутизаторът изпраща *Packet In* съобщение към контролера за обработка. Контролерът анализира пакета и при липса на запис за MAC адреса на източника в глобалния мрежови изглед го добавя заедно с номера на съответния мрежови порт. По този начин се изгражда пълна асоциация между хостовете и маршрутизаторите, към които те са директно свързани.

След оформяне на глобалния мрежови изглед, контролерът активира фонов процес за събиране на NSI от маршрутизаторите и следи за мрежови промени. При откриване на нов маршрутизатор или връзка, системата задава тегловен коефициент по подразбиране, осигурявайки възможност за коректно маршрутизиране още преди да бъде налична актуална статистическа информация. Този подход гарантира непрекъснатост на маршрутизиращия процес и бърза адаптация към динамични промени в топологията, като по този начин се поддържа оптимално разпределение на мрежовия трафик дори при непълни данни.

Маршрутизиращият процес е базиран на алгоритъмът на Дейкстра за най-кратък път с разширени тегловни коефициенти за възлите и връзките между тях. SDN мрежовата топология е представена като неориентиран тегловен граф $G = (V, E)$, където V е набор от възли (" $v \in V$ "), а E е набор от връзки (" $e \in E$ "). Тегловните коефициенти за възлите и връзките са неотрицателни стойности, посредством които алгоритъмът избира най-малко натовареният маршрут за пренос на пакети. Нека за графа $RTT(v)$ представлява пълзящата средна стойност на времето за получаване на обратен отговор за *echo* пакети, които се обменят между контролера и възлите. Нека $Throughput(v)$ и $Throughput(e)$ е пълзящата средна стойност на пропускателната способност на v и e от всички потоци от данни, а $Capability(v)$ представлява капацитета на средната пропускателна способност на v , която може да бъде обработена. Нека $Bandwidth(e)$ е честотната лента на e , която може да бъде обработена, и нека $Dropped(e)$ е броя на пропадналите пакети на e . В (2.5) е представено изчислението на тегловните коефициенти за възлите, а в (2.6) е представено изчислението на тегловните коефициенти за връзките.

$$nw[v] = \frac{RTT(v) \times Throughput(v)}{Capability(v)} \quad (2.5)$$

$RTT(v)$ е пълзящата средна тегловна стойност и $Throughput(v)$ е пълзящата средна тегловна стойност на всички връзки директно свързани към v .

$$ew[e] = \frac{\text{Throughput}(e)}{\text{Bandwidth}(e) - \text{Dropped}(e)} \quad (2.6)$$

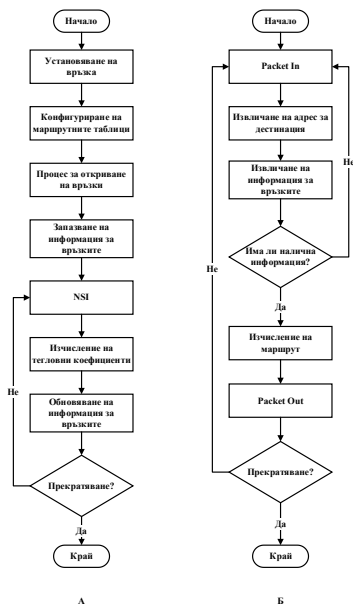
$\text{Throughput}(e)$ е пълзящата средна тегловна стойност на e , която е получена, посредством хармоничната последователност от (2.1), а $\text{Dropped}(e)$ е броя на пропадналите пакети при получаването или изпращането им.

RTT се измерва в секунди, Throughput и Capacity се измерват в килобайти за секунда, а за мерна единица на Dropped пакетите в (2.6) се използва брой пропаднали пакети. За да бъдат проследени каквито и да е промени в мрежата, контролерът извлича информация от всички възли на всеки петнадесет секунди и преизчислява наново тегловните коефициенти. Също така, контролерът следи и наличността на възлите и връзките, както и за добавянето на нови връзки.

2.2.3. Блок схема на алгоритъма за динамично маршрутизиране

Откриването на връзките между мрежовите устройства и извличане на мрежова информация, както и блок схемата на алгоритъма за динамично маршрутизиране е представена на фиг. 2.4. Процесът по установяване на връзка между контролера и маршрутизатора стартира с обмен на съобщения чрез OpenFlow, при които се договарят съвместимата версия на протокола и функционалните възможности на устройствата (Фиг. 2.4-А). Същевременно, контролерът извлича данни за наличните мрежови портове и тяхната пропускателна способност. При възникване на грешка, връзката се прекратява и процесът по установяване се рестартира.

След успешна инициализация, контролерът извършва нулиране на маршрутните таблици чрез *Flow Mod Reset* и конфигурира маршрутизатора така, че всички входящи пакети да бъдат препращани към него за обработка.



Фиг. 2.4.Откриване на връзките между мрежовите устройства и извличане на мрежова информация – А и блок схема на алгоритъма за динамично маршрутизиране в SDN – Б

В етапа на откриване, контролерът инициира изпращане на LLDP съобщения през всички отворени портове на маршрутизатора, което позволява идентифициране на съседни маршрутизатори. Получената информация от съседните маршрутизатори се регистрира в глобалния мрежови изглед, формирайки актуална картина на топологията и връзките в мрежата.

След това, контролерът стартира фонов процес за периодично извличане на NSI и наблюдение на мрежовата топология, като едновременно с това изчислява тегловните коефициенти на връзките и възлите.

При получаване на *Packet In* съобщение се извършва анализ на Ethernet фрейма. Ако пакетът е ARP с *broadcast* адрес за дестинация, контролерът проверява за наличието на запис за MAC адреса на източника в някои от другите свързани маршрутизатори (Фиг. 2.4-Б). При липса на такъв запис, информацията за MAC адреса на източника и мрежовия порт, на който е получен пакета, се добавя към базата данни, предотвратявайки създаването на дублиращи връзки към хостовете, в противен случай пакетът се препраща към всички портове, с изключение на входния.

Когато контролерът получи *Packet In* съобщение, съдържащо конкретен MAC адрес за дестинация, се пристъпва към откриване към кой маршрутизатор е свързано устройството. След това се извлича актуалната информация за връзките и се изчислява оптималния маршрут, чрез алгоритъмта на Дейкстра, отчитайки тегловните коефициенти на възлите и връзките. Накрая, изчисленият маршрут се прилага, чрез *Packet Out* инструкция за следващ хоп. Като допълнение, контролерът прилага механизъм за защита срещу зацикляне на ARP съобщения, като проверява комбинацията от MAC адрес на източника и IP адрес на получателя, за да игнорира вече обработени пакети.

2.3. Предлагаема система от показатели за оценяване на маршрутизиращи алгоритми

За да се осигури обективно и комплексно сравнение на ефективността, натоварването на мрежовата инфраструктура и предоставяното QoS от маршрутизиращите алгоритми в SDN среди, е необходима прецизно подбрана система от критерии. Съществуващата научна литература съдържа ограничен брой изследвания, насочени към сравнителен анализ на маршрутизиращи механизми в SDN мрежи, като наличните подходи се различават по обхват и дълбочина на изследване.

Част от проучванията разглеждат показатели като закъснение на предаваните пакети, възможните прекъсвания по мрежовите трасета, загуба на пакети по време на предаване, производителност на пропускателната способност и възможност за скалируемост при нарастване на мрежовия трафик или мрежовата топология. В някои е предложена четириизмерна рамка за оценка на *unicast* маршрутизиращи алгоритми, а в други сравнение на SDN базирани с традиционни маршрутизиращи протоколи по скорост на препредаване на пакети и време на конвергенция на мрежовия маршрут. Тези параметри са недостатъчни за извършване на цялостен комплексен сравнителен анализ на различни маршрутизиращи механизми.

В дисертационния труд са предложени девет критерия за оценяване работата на различните алгоритми за маршрутизиране на трафика в SDN мрежи:

- **цялостно натоварване на контролера, при изчисленията за предоставяне на най-подходящ маршрут за пренос на пакети;**
- **памет, заета от контролера, за да съхрани информацията за връзките между маршрутизаторите и крайните устройства;**
- **време за откриване на мрежова топология;**

- бързо възстановяване при промяна на мрежовата топология и предоставяне на нови пътища за предаваните пакети;
- натоварване на мрежата;
- трептене при преноса на данни;
- съотношение на изпратени и доставени пакети в мрежата;
- закъснение на предаваните пакети;
- поддържани мрежови топологии.

Предложените критерии за извършване на комплексен сравнителен анализ на маршрутизиращи алгоритми в SDN мрежи могат да бъдат приложени за алгоритми, извършващи само статично маршрутизиране на трафика. Поради различия в начина на работа и цели на прилагане, динамичните маршрутизиращи алгоритми не могат да бъдат сравнени със статичните маршрутизиращи алгоритми в SDN мрежи. Съответно наборът от критерии за комплексно сравнение на динамични маршрутизиращи алгоритми при SDN мрежи се предлага да е следния:

- цялостно натоварване на контролера, при изчисленията за предоставяне на най-подходящ маршрут за пренос на пакети;
- памет, заета от контролера, за да съхрани информацията за връзките между маршрутизаторите и крайните устройства;
- време за откриване на мрежова топология;
- бързо възстановяване при промяна на мрежовата топология и предоставяне на нови пътища за предаваните пакети;
- натоварване на мрежата;
- трептене при преноса на данни;
- съотношение на изпратени и доставени пакети в мрежата;
- закъснение на предаваните пакети;
- възможност на маршрутизиращия механизъм да използва по-добре пропускателната способност на връзките, като взема предвид производителността на пропускателната способност на съответния път;
- интервал за проверка на наличността на маршрутизатора;
- поддържани мрежови топологии.

2.4. Предлагаема система от показатели за оценяване на SDN контролери за изследване на маршрутизиращи алгоритми за балансирано разпределение на мрежовия трафик

В литературата могат да бъдат намерени редица сравнителни анализи на контролери за софтуерно дефинирани мрежи, като в различните проучвания са разгледани и представени различен набор от критерии за извършване на сравнението. Не всички от представените критерии са достатъчни и приложими за оценка на SDN контролери, за приложимостта им при изследване на маршрутизиращи алгоритми за балансирано разпределение на мрежовия трафик. Затова, в дисертационния труд се предлага следната система от критерии:

- поддържани операционни системи;
- поддържани версии на OpenFlow;
- програмен език;
- скалируемост на контролера за управление на мрежовата топология;
- възможност за добавяне и промяна на системни модули;

- възможност за стартиране на функции и процеси през определен интервал от време (CRON);
- използване на нишки;
- възможност за управление на мрежовия трафик;
- достъпна мрежова информация от допълнително разработените модули;
- поддръжка и управление на LLDP;
- потребителски интерфейс;
- техническа документация;
- заемано файлово пространство;
- софтуерен лиценз.

На база предложените алгоритми за маршрутизиране на трафика в SDN мрежи и предложената система от показатели за оценяване на маршрутизиращи алгоритми, са направени следните изводи:

- Предложен е алгоритъм за статично маршрутизиране на трафика в SDN базирани мрежи, при който успешно се откриват връзките между маршрутизиращите устройства и крайните хостове. Алгоритъмът осигурява ефективно маршрутизиране на предаваните мрежови пакети, като се спазват изискванията за балансирано разпределяне на мрежовия трафик;
- Предложен е алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика в SDN базирани мрежи, при който се постига ефективно управление на мрежовия трафик, според натоварването на различните мрежови пътища. Алгоритъмът осигурява надеждни показатели за QoS на мрежата;
- Предложена е система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за статично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи;
- Предложена е система от показатели за оценяване на ефективността на алгоритми за динамично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи;
- Предложена е система от показатели за оценяване на SDN контролери за изследване на маршрутизиращи алгоритми за балансирано разпределение на мрежовия трафик;
- Разработен е SDN контролер, в който са внедрени, както съществуващи маршрутизиращи алгоритми, така и предложените в дисертационния труд алгоритми.

Глава 3. Експериментални изследвания и резултати

В Глава 3 е направен комплексен сравнителен анализ на маршрутизиращите алгоритми за SDN мрежи. Изследвани са описаните в Глава 1 класически и предложените от автора в Глава 2 алгоритми за статично и динамично маршрутизиране при SDN мрежи. Симулирани са различни мрежови топологии и са представени получените резултати за изследване на разпределено натоварване на мрежите. Извършен е комплексен сравнителен анализ на разгледаните в Глава 1 SDN контролери и разработения от автора контролер за управление на SDN мрежи.

3.1. Качествени и количествени параметри за анализ на маршрутизиращи алгоритми

Поради различните използвани измервания и метрики, не е възможно извеждането на конкретна функция за оценка на маршрутизиращи алгоритми за равномерно разпределение на трафика. В такива случаи се препоръчва да бъдат използвани усреднени комплексни показатели. За тази цел, се избира една от следните математически зависимости, за да бъде изчислен комплексният показател за качество – квадратична, геометрична, аритметична или хармонична.

Комплексният сравнителен анализ е изграден върху комбинираното прилагане на средна аритметична (формула 3.1) и средна геометрична оценка (формула 3.2), като изборът на тези математически зависимости се определя като оптимален от гледна точка на състоятелност, нормираност и сравнимост на резултатите.

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n b_i d_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (3.1)$$

$$R_g = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{b_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}} \quad (3.2)$$

Този подход минимизира влиянието на субективни фактори при оценяването на обекта на сравнение, като осигурява обективност и еднозначност в интерпретацията на резултатите. Използването на двете средни стойности осигурява компромисно изпълнение на условията за максимална чувствителност към влошаване на отделните показатели за качество и минимална чувствителност към грешките при тяхното определяне, което повишава надеждността на анализа.

3.2. Изследвани мрежови топологии и използвани конфигурации

За да се извърши точно и обективно сравнение на мрежовите алгоритми за равномерно разпределение на мрежовия трафик, е необходимо те да бъдат съпоставени с подобни такива в различни мрежови топологии. По този начин могат да бъдат извлечени адекватни стойности за тяхната производителност, причинено мрежово закъснение, време за изчисление на маршрути и др. Поради тази причина, за целите на изследването в дисертационния труд са избрани следните мрежови топологии:

- **циклична;**
- **линейна;**
- **дървовидна;**
- **комбинирана (*Abilene*).**

Проведените изследвания са реализирани в хибридна среда, съчетаваща Windows операционна система за хост и Linux виртуална машина за симулация на мрежовите топологии. Виртуализацията е осъществена, чрез Hyper-V, вграден в Windows, като SDN контролерът работи директно върху хост системата. Комуникацията между симулираната топология и контролера се реализира, чрез виртуален мрежови маршрутизатор на Hyper-V, конфигуриран да използва безжичния мрежови адаптер на хост машината. Мониторингът на мрежовия трафик се извършва с помощта на Wireshark, настроен да проследява обмена на данни през виртуалния маршрутизатор.

3.3. Резултати от изследвания на алгоритми за статично маршрутизиране на трафика

С цел изследване ефективността и равномерното разпределение на трафика в SDN мрежи са проведени тестове за времето необходимо за откриване на мрежовата топология, брой обменени пакети при откриване на мрежова топология, мрежово закъснение, съотношение на доставени пакети, трептения при преноса на данни и пропускателна способност на връзките за предложения, OSPF и WSP алгоритми в различни мрежови топологии, като са използвани пакети с размер 64, 256, 1024 и 2048 байта и брой обменени пакети 10, 25, 50 и 100 между хостове на различно разстояние.

Таблица 3.1 представя получените средноаритметични резултати от проведените тестове при брой обменени пакети 100.

Таблица 3.1. Резултати за статични маршрутизиращи алгоритми





Резултатите от проведените експериментални изследвания показват, че предложеният в дисертационния труд алгоритъм за статично маршрутизиране предоставя цялостно по-добри резултати при всички от разгледаните мрежови топологии, сравнено с алгоритмите за маршрутизиране OSPF и SWP. В случаите в които, хостът, който изпраща пакета, както и хостът получател се намират в един и същ възел, времената за маршрутизиране на пакетите е пренебрежимо еднакво, сравнено с по-отдалечените дестинации в мрежовите топологии. Това се дължи на факта, че и при трите маршрутизиращи алгоритъма, първоначално се проверяват директните връзки на хостовете с маршрутизаторите при определяне на маршрут, след което при липса на съпадение се определя маршрут посредством следващ хоп.

Таблица 3.2 представя получените средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на разгледаните алгоритми за статично маршрутизиране.

Таблица 3.2. Средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на алгоритми за статично маршрутизиране на трафик

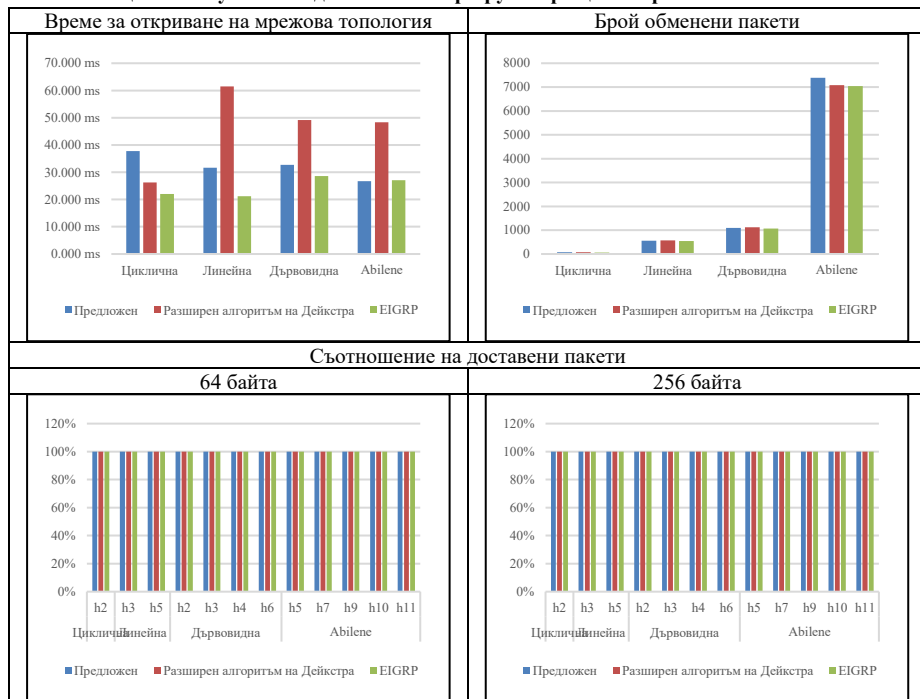
Комплексна оценка	Предложен алгоритъм	OSPF	SWP
Ra	0.76	0.60	0.61
Rg	1.000	0.999	0.999

Според получените резултати за комплексните оценки, може да се твърди, че предложеният алгоритъм за статично маршрутизиране предоставя много по-добри стойности за средна аритметична комплексна оценка, сравнено с OSPF и SWP, докато за средна геометрична комплексна оценка, предложеният алгоритъм има близки стойности до изследваните алгоритми. Предложеният алгоритъм предоставя няколко предимства по отношение на: цялостно натоварване на контролера при изчисленията за предоставяне на най-подходящ маршрут за пренос на пакети, памет, заета от контролера за да съхрани информацията за връзките между маршрутизаторите и крайните устройства, време за откриване на мрежова топология, бързо възстановяване при промяна на мрежовата топология и предоставяне на нови пътища за предаваните пакети, както и трептение при преноса на данни.

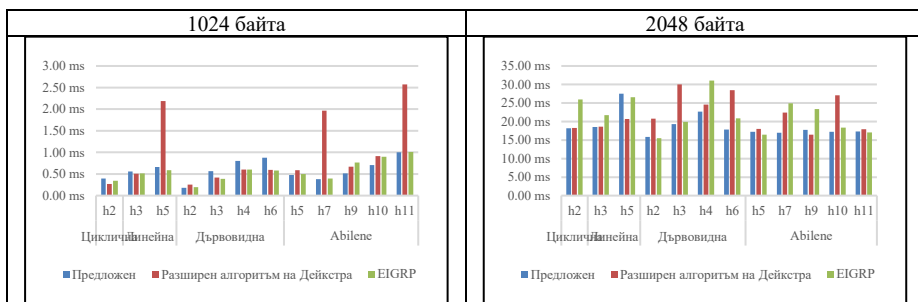
3.4. Резултати от изследвания на алгоритми за динамично маршрутизиране на трафика

Таблица 3.3 представя получените средноаритметични резултати от проведените тестове за динамични маршрутизиращи алгоритми при 100 обменени пакета.

Таблица 3.3. Резултати за динамични маршрутизиращи алгоритми







На база резултатите от проведените експериментални изследвания се вижда, че предложеният алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика предоставя съпоставимо добри резултати за времето необходимо за откриване на мрежови топологии, но същевременно показва по-високи стойности при броя на обменените пакети. Това се дължи на статичните мрежови параметри, които се използват при EIGRP за маршрутизиране на пакети, докато при предложеният алгоритъм и разширеният алгоритъм на Дейкстра, броят на обменените пакети при откриване на мрежова топология е сравнително близък. По отношение на мрежовото закъснение, предложеният алгоритъм за динамично маршрутизиране предоставя цялостно по-добри резултати за маршрутизиране на пакети с размер от 2048 байта при всички от разгледаните мрежови топологии. При обмена на пакети с размери 64, 256 и 1024 байта, предложеният алгоритъм за динамично маршрутизиране предоставя пренебрежимо еднакви резултати сравнени с тези на EIGRP и Разширеният алгоритъм на Дейкстра. По отношение на изследването на трептенията, предложеният алгоритъм за динамично маршрутизиране предоставя по-добри резултати за маршрутизиране на пакети с размер 2048 байта, отколкото при маршрутизирането на пакети с по-малък размер.

Според извършените комплексни оценки и техните резултати (Таблица 3.4), може да се твърди, че предложеният алгоритъм за динамично маршрутизиране се явява по-добър.

Ако бъдат разгледани поотделно резултатите за използваните критерий, се вижда, че и трите алгоритъма предоставят еднакви резултати за памет, заета от контролера, за да съхрани информацията за връзките между маршрутизаторите и крайните устройства, съотношение на изпратени и доставени пакети в мрежата и поддържани мрежови топологии. Докато за критериите време за откриване на мрежова топология и натоварване на мрежата, EIGRP предоставя най-добри резултати. Предложеният алгоритъм предоставя еднакви стойности с разширения алгоритъм на Дейкстра за критериите цялостно натоварване на контролера при изчисленията за предоставяне на най-подходящ маршрут за пренос на пакети, закъснение на предаваните пакети, възможност на маршрутизиращия механизъм да използва по-добре пропускателната способност на връзките, като взема предвид производителността на пропускателната способност на съответния път и интервал за проверка на наличността на маршрутизатора, а също така и най-добри стойности на критерия трептене при преноса на данни сравнено с останалите два алгоритъма.

Таблица 3.4. Средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на алгоритми за динамично маршрутизиране на трафик

Комплексен показател	Предложен алгоритъм	Разширен алгоритъм на Дейкстра	EIGRP
Ra	0.73	0.69	0.71
Rg	0.963	0.957	0.960

3.5. Оценка за сравнение на разработения SDN контролер за изследване на маршрутизиращи алгоритми с други съществуващи

Таблица 3.5 и Таблица 3.6 представят получените резултати от извършените комплексни оценки на разглежданите SDN контролери.

Таблица 3.5. Средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на Cisco DNA, NuageNetworks, SEL-5056, NOX, POX и OpenDaylight SDN контролери

Комплексен показател	Cisco DNA	NuageNetworks	SEL-5056	NOX	POX	OpenDaylight
Ra	0.56	0.60	0.49	0.77	0.89	0.90
Rg	0.796	0.742	0.578	0.691	0.953	0.868

Таблица 3.6. Средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на SDN контролери

Комплексен показател	Предложен	Open Network Operation System	Floodlight	Ryu	Beacon
Ra	0.76	0.94	0.92	0.91	0.87
Rg	0.830	0.921	0.886	0.886	0.767

Според получените резултати от изследването и широкия набор от критерии се вижда, че най-подходящите SDN контролери за изследване на маршрутизиращи алгоритми са POX, който предоставя най-висока стойност за средна геометрична оценка и Open Network Operation System, който предоставя най-висока стойност за средна аритметична оценка.

При разглеждане на критериите поотделно, става ясно, че предложеният SDN контролер предоставя съизмерими резултати с останалите контролери за: поддържани операционни системи, възможност за добавяне и промяна на системни модули, поддържани версии на OpenFlow, възможност за стартиране на функции и процеси през определен интервал от време (CRON), използване на нишки, възможност за управление на мрежовия трафик, достъпна мрежова информация от допълнително разработените модули, поддръжка и управление на LLDP, техническа документация и софтуерен лиценз, както и по-добри резултати за програмен език и заемано файлово пространство. Това дава повод за твърдение, че предложеният SDN контролер е подходящ за целите на обучението.

Изводите, които могат да се направят на основата на експерименталните резултати, представени в трета глава са:

- На база резултатите от проведените експериментални изследвания може да се приеме, че предложеният в дисертационния труд алгоритъм за статично маршрутизиране на трафика дава по-добри резултати от разглежданите алгоритми за статично маршрутизиране при: време необходимо за откриване на мрежова топология; брой обменени пакети при откриване на мрежова топология и средно мрежово закъснение, както и по отношение на мрежови трептения при преноса на данни, при обмен на пакети с размер от 2048 байта, а също така и при обмен на 100 пакета. По отношение на показателя за съотношение на изпратени и доставени пакети, предложеният алгоритъм предоставя еднакви резултати с разглежданите алгоритми.

- Анализът на предложения в дисертационния труд алгоритъм за статично маршрутизиране на трафика, извършен, чрез комплексна аритметична и геометрична оценка, показва, че според формулираните критерии, той се явява по-добър от останалите.
- Резултатите от проведените експериментални изследвания, дават основание да се приеме, че предложеният в дисертационния труд алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика, дава по-добри резултати, спрямо разгледаните алгоритми за динамично маршрутизиране на трафика по отношение на: време необходимо за откриване на връзките между маршрутизатори и хостове, при мрежова топология *Abilene*; брой обменени пакети при откриване на циклична, линейна и дървовидна мрежова топология, сравнено с разширения алгоритъм на Дейкстра; средно мрежово закъснение при обмен на пакети с размер от 2048 байта; мрежови трептения при обмен на пакети с размер от 2048 байта. По отношение на показателя за съотношение на изпратени и доставени пакети, предложеният алгоритъм предоставя еднакви резултати с EIGRP и разширения алгоритъм на Дейкстра.
- Комплексната аритметична и геометрична оценка на предложения в дисертационния труд алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика показва, че според формулираните в дисертационния труд критерии, той се явява по-добър от останалите.
- Извършените комплексни оценки на разработения SDN контролер за целите на дисертационния труд показват, че неговите характеристики са съизмерими с тези на разгледаните SDN контролери, което дава повод за твърдение, че е подходящ за целите на обучението.

Основни изводи и предложения за практиката

Софтуерно дефинираните мрежи предлагат гъвкавост и динамичност при управлението на мрежовата инфраструктура, чрез отделяне на управляващата логика от физическите компоненти и нейното централизиране в софтуерен контролер. Това осигурява възможност за виртуално моделиране и тестване на мрежови конфигурации преди внедряване, както и за изследване на нови методи за повишаване на сигурността, надеждността и ефективността на преноса на данни. Поради тази причина, за целта на дисертационния труд са изследвани различни алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика при SDN мрежи, посредством симулация на различни мрежови топологии и различен брой връзки. Предложена е система от индикатори, която може да бъде приложена за анализ и оценка на качеството и ефективността на алгоритми за статично и динамично маршрутизиране. На база предложената система от показатели, е извършено експериментално изследване и сравнителен анализ на предложените алгоритми за статично и динамично маршрутизиране при SDN мрежи с подобни. Създадената система от показатели позволява цялостна оценка на функционалността на алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика.

Управлението на мрежовия трафик в реални ситуации не е тривиална задача, тъй като изисква надеждно и сигурно доставяне на мрежовите пакети от източника до дестинацията, без високи нива на закъснение и с минимално наличие на трептения, които да повишат качеството на услугите, използващи мрежовата инфраструктура. Един от основните аспекти свързани с ефективното оползотворяване на мрежовата инфраструктура и предоставяне на високо качество на услугите, е осигуряването на равномерно и оптимално натоварване на маршрутизаторите и мрежовите връзки.

Предложени са алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика при SDN мрежи, които ефективно управляват мрежовия трафик посредством балансирано натоварване на

маршрутизаторите и мрежовите връзки, като същевременно спазват и допълнителните критерии за качество на услугите. Посредством симулация на различни мрежови топологии с различен брой връзки, е доказана ефективността на предложените алгоритми за статично и динамично маршрутизиране на трафика. При алгоритъма за статично маршрутизиране се постигат по-добри резултати при критериите за: време необходимо за откриване на мрежова топология; брой обменени пакети при откриване на мрежова топология; средно мрежово закъснение при обмен на пакети между отделните хостове; по-ниски стойности на трептенията при преноса на данни с размер на пакетите от 2048 байта, както и при обмен на по-голям брой пакети. При алгоритъма за динамично маршрутизиране се постигат по-добри показатели за: време необходимо за откриване на връзките между маршрутизатори и хостове при мрежова топология *Abilene*; брой на обменени пакети при откриване на циклична, линейна и дървовидна мрежова топология; средно мрежово закъснение при обмен на пакети с размер от 2048 байта; по-ниски стойности на мрежовите трептения при обмен на пакети с размер от 2048 байта.

Дефинирана е система от индикатори за оценка на SDN контролери. Дефинираната система от индикатори за сравнение на SDN контролери може да бъде използвана като базово средство за оценка на контролери при изследване на SDN мрежи.

Разработеният SDN контролер може да бъде използван за изследване на функционалността на нови маршрутизиращи алгоритми при SDN мрежи.

Приноси на дисертационния труд

Приноси с научен характер:

- Предложен е алгоритъм за статично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи, при който се предоставя балансирано разпределение на трафика и се постига подобро качество на услугите;
- Предложен е алгоритъм за динамично маршрутизиране на трафика в SDN мрежи, при който мрежовия трафик се управлява, според мрежовото натоварване;

Приноси с научно-приложен характер:

- Дефинирана е система от показатели за оценяване на алгоритми за статично маршрутизиране в SDN базирани мрежи;
- Дефинирана е система от показатели за оценяване на алгоритми за динамично маршрутизиране в SDN базирани мрежи;
- Дефинирана е система от показатели за оценяване на SDN контролери;

Приноси с приложен характер:

- Разработен е SDN контролер за изследване на статични и динамични маршрутизиращи алгоритми;

Публикации по темата на дисертационния труд

1. **Тодоров, Димитър.** Методи и средства за симулация на SDN-NFV мрежи. // Компютърни науки и технологии, ТУ-Варна, 2018, бр. 2, с. 82-89, ISSN: 1312-3335
2. **Todorov, D.,** Valchanov, H., Aleksieva, V., Load Balancing model based on Machine Learning and Segment Routing in SDN. Published In: 2020 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), Varna, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAI50593.2020.9311385 (Indexed in Scopus, Citations: 19)
3. **Todorov, D.,** Valchanov, H., Aleksieva, V., Simple routing algorithm with link discovery between source and destination hosts in SDN networks. Published In: 2021 International

Conference Automatics and Informatics (ICAI), Varna, Bulgaria, 2021, pp. 188-191, doi: 10.1109/ICA152893.2021.9639742 (Indexed in Scopus, Citations: 5)

4. **Todorov, D.**, Valchanov, H., Aleksieva, V., Shortest path routing algorithm with dynamic composite weights in SDN networks. Published In: 2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), Varna, Bulgaria, 2021, pp. 193-197, doi: 10.1109/ICA152893.2021.9639512 (Indexed in Scopus, Citations: 2)
5. **Todorov, D.**, Valchanov, H., Aleksieva, V., Comparative evaluation of traffic load balancing and QoS in SDN networks., Published In: AIP Conf. Proc. 18 August 2022; 2570 (1): 020016. <https://doi.org/10.1063/5.0099807> (Indexed in Scopus, Citations: 1)

Специални благодарности на:

проф. д-р инж. Христо Вълчанов, проф. д-р инж. Венета Алексиева, моето семейство, моите родители и на всички, които са били съпричастни към моята дисертационна работа.

ABSTRACT

Dissertation Title: Methods and Tools for Load Balancing and QoS Enhancement in SDN-Based Networks

of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy

by MSc Dimitar Nikolov Todorov

The presented PhD aims to investigate the impact of traffic routing and load balancing algorithms on the quality of service in networks based on SDN technology.

The first chapter examines the evolution of computer networks and the transition from traditional network architecture to network function virtualisation (NFV) and software-defined networking (SDN). The architectures of NFV and SDN, as well as the SDN control protocol OpenFlow, are presented. A combined SDN-NFV architecture and its significance for modern network infrastructures are discussed. Approaches for ensuring quality of service (QoS) and methods for network load balancing are analysed. Algorithms for static and dynamic traffic routing are reviewed, with a summary of their main advantages and disadvantages in the context of traffic management in SDN networks. The main goals and tasks of the PhD thesis are formulated.

Chapter Two outlines the motivations for developing routing algorithms for SDN networks. A system of indicators is proposed to evaluate the performance of routing algorithms in SDN networks. Static and dynamic routing algorithms in SDN networks are proposed in the dissertation described. A system of indicators for evaluating SDN controllers is proposed. An SDN controller for examining routing algorithms in SDN networks is proposed.

In Chapter Three, a comprehensive comparative analysis of SDN controllers is presented. The classic algorithms described in Chapter One, together with the static and dynamic routing algorithms for SDN networks proposed in Chapter Two, are examined. Various network topologies with different node counts are simulated, and the results are analysed to assess efficiency and quality of service. A comprehensive comparative analysis of static and dynamic routing algorithms for SDN networks was performed.